

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
 федеральное государственное автономное  
 образовательное учреждение высшего образования  
 «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Школа \_\_\_\_\_ Инженерная школа энергетики  
 Направление подготовки 13.04.01 Теплоэнергетика и теплотехника  
 Отделение школы (НОЦ) НОЦ И.Н. Бутакова

### МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
<b>Исследование влияния способов монтажа первичных измерительных преобразователей на качество работы АСУ пароперегревателем энергетического котла</b>

УДК 681.586:681.51.621.165.013.3

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5БМ74	Бойкова Тамара Сергеевна		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент НОЦ И.Н. Бутакова ИШЭ	Иванова Е. В.	к.ф.-м.н.		

Консультант

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
ст. преп. НОЦ И.Н. Бутакова ИШЭ	Атрошенко Ю.К.	к.т.н.		

### КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН ШБИП	Киселева Елена Станиславовна	к.э.н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ООД ШБИП	Куликова Ольга Александровна	к.т.н.		

### ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ИШФВП	Стрижак Павел Александрович	д.ф.-м.н., профессор		

Томск – 2019 г.

## Планируемые результаты освоения

Код	Результат обучения*	Требования ФГОС ВО, СУОС, критериев АИОР, и/или заинтересованных сторон
Общие по направлению подготовки		
<i>расчетно-проектная и проектно-конструкторская деятельность:</i>		
P1	применять передовые знания и достижения для формулирования заданий на разработку проектных решений, проектировать инновационные теплоэнергетические и теплотехнические системы и оборудование, разрабатывать проектные решения, связанные с модернизацией технологического оборудования	Требования ФГОС ВО, СУОС ТПУ (УК-1 <sup>1**</sup> , УК-2, ПК-1, ПК-2), Критерий 5 АИОР (п.2.1)согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI, требования профессиональных стандартов (40.011 «Специалист по научно-исследовательским и опытно-конструкторским разработкам», 20.001 «Работник по оперативному управлению объектами тепловой электростанции», 20.014 «Работник по организации эксплуатации тепломеханического оборудования тепловой электростанции», 16.005 «Специалист по эксплуатации котлов, работающих на твердом топливе», 16.012 «Специалист по эксплуатации котлов на газообразном, жидком топливе и электронагреве», 16.065 «Инженер-проектировщик технологических решений котельных, центральных тепловых пунктов и малых теплоэлектроцентралей», 20.022 «Работник по оперативному управлению тепловыми сетями», 20.023 «Работник по расчету режимов тепловых сетей», 20.024 «Работник по ремонту оборудования, трубопроводов и арматуры тепловых сетей», 20.025 «Работник по эксплуатации оборудования, трубопроводов и арматуры тепловых сетей», 16.014 «Специалист по эксплуатации трубопроводов и оборудования тепловых сетей», 16.064 «Инженер-проектировщик тепловых сетей», 19.011 «Специалист по управлению балансами и поставками газа»)
<i>производственно-технологическая деятельность:</i>		
P2	интегрировать знания различных областей для разработки мероприятий по совершенствованию технологии производства, обеспечению экономичности, надежности и безопасности эксплуатации, ремонта и модернизации энергетического, теплотехнического и теплотехнологического оборудования	Требования ФГОС ВО, СУОС ТПУ (УК-1, УК-2, ПК-3, ПК-4, ПК-5), Критерий 5 АИОР (п. 2.2), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI , требования профессиональных стандартов (40.011 «Специалист по научно-исследовательским и опытно-конструкторским разработкам», 20.001 «Работник по оперативному управлению объектами тепловой электростанции», 20.014 «Работник по организации эксплуатации тепломеханического оборудования тепловой электростанции», 16.005 «Специалист по эксплуатации котлов, работающих на твердом топливе», 16.012 «Специалист по эксплуатации котлов на газообразном, жидком топливе и электронагреве», 20.022 «Работник по

<sup>1</sup> \*\* - универсальные компетенции из СУОС ТПУ (для 2017 г. приема - приказ № 2226 от 01.03.2017 г).

		оперативному управлению тепловыми сетями», 20.023 «Работник по расчету режимов тепловых сетей», 20.024 «Работник по ремонту оборудования, трубопроводов и арматуры тепловых сетей», 20.025 «Работник по эксплуатации оборудования, трубопроводов и арматуры тепловых сетей», 16. «Специалист по эксплуатации трубопроводов и оборудования тепловых сетей», 16.064 «Инженер-проектировщик тепловых сетей», 19.011 «Специалист по управлению балансами и поставками газа»)
P3	применять современные методы и средства практической инженерной деятельности в теплоэнергетике, теплотехнике и теплотехнологиях	Требования ФГОС ВО, СУОС ТПУ (УК-1, УК-2, ПК-5, ПК-6), Критерий 5 АИОР (пп. 1.6, 2.3), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI, требования профессиональных стандартов (40.011 «Специалист по научно-исследовательским и опытно-конструкторским разработкам», 20.001 «Работник по оперативному управлению объектами тепловой электростанции», 20.014 «Работник по организации эксплуатации тепломеханического оборудования тепловой электростанции», 16.005 «Специалист по эксплуатации котлов, работающих на твердом топливе», 16.012 «Специалист по эксплуатации котлов на газообразном, жидком топливе и электронагреве», 20.022 «Работник по оперативному управлению тепловыми сетями», 20.023 «Работник по расчету режимов тепловых сетей», 20.024 «Работник по ремонту оборудования, трубопроводов и арматуры тепловых сетей», 20.025 «Работник по эксплуатации оборудования, трубопроводов и арматуры тепловых сетей», 16. «Специалист по эксплуатации трубопроводов и оборудования тепловых сетей», 16.064 «Инженер-проектировщик тепловых сетей», 19.011 «Специалист по управлению балансами и поставками газа»)
P4 (P6)	применять знания нетехнических ограничений инженерной деятельности, разрабатывать мероприятия по безопасности жизнедеятельности персонала и населения, предотвращать экологические нарушения	Требования ФГОС ВО, СУОС ТПУ (УК-1, УК-2, ПК-9), Критерий 5 АИОР (п. 1.1), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI, требования профессиональных стандартов (40.011 «Специалист по научно-исследовательским и опытно-конструкторским разработкам», 20.001 «Работник по оперативному управлению объектами тепловой электростанции», 20.014 «Работник по организации эксплуатации тепломеханического оборудования тепловой электростанции», 16.005 «Специалист по эксплуатации котлов, работающих на твердом топливе», 16.012 «Специалист по эксплуатации котлов на газообразном, жидком топливе и электронагреве», 20.022 «Работник по оперативному управлению тепловыми сетями», 20.023 «Работник по расчету режимов тепловых сетей», 20.024 «Работник по ремонту оборудования, трубопроводов и арматуры тепловых сетей», 20.025 «Работник по эксплуатации оборудования, трубопроводов и арматуры тепловых сетей», 16. «Специалист по эксплуатации

		трубопроводов и оборудования тепловых сетей», 16.064 «Инженер-проектировщик тепловых сетей», 19.011 «Специалист по управлению балансами и поставками газа»)
<i>научно-исследовательская деятельность:</i>		
P5 (P4)	применять глубокие знания для планирования и постановки задачи инновационного инженерного исследования, выявлять приоритеты решения задач, выбирать и создавать критерии оценки, применять инновационные методы исследования, проводить исследования, критически интерпретировать, публично представлять и обсуждать результаты научных исследований	Требования ФГОС ВО, СУОС ТПУ (УК-1, УК-2, ПК-7), Критерий 5 АИОР (пп.2.4, 2.5), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI, требования профессиональных стандартов (20.001 «Работник по оперативному управлению объектами тепловой электростанции», 20.014 «Работник по организации эксплуатации тепломеханического оборудования тепловой электростанции», 16.005 «Специалист по эксплуатации котлов, работающих на твердом топливе», 20.022 «Работник по оперативному управлению тепловыми сетями», 20.025 «Работник по эксплуатации оборудования, трубопроводов и арматуры тепловых сетей», 16. «Специалист по эксплуатации трубопроводов и оборудования тепловых сетей», 19.011 «Специалист по управлению балансами и поставками газа»)
<i>организационно-управленческая деятельность:</i>		
P6 (P5)	руководить коллективом специалистов различных направлений и квалификаций, действовать в нестандартных ситуациях, принимать организационно-управленческие решения и нести за них ответственность при организации работ, разрабатывать мероприятия по предотвращению экологических нарушений	Требования ФГОС ВО, СУОС ТПУ (УК-2, УК-3, УК-4, УК-5, ОК-2, ПК-8, ПК-10), Критерий 5 АИОР (п. 1.1), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI, требования профессиональных стандартов (40.011 «Специалист по научно-исследовательским и опытно-конструкторским разработкам», 20.001 «Работник по оперативному управлению объектами тепловой электростанции», 20.014 «Работник по организации эксплуатации тепломеханического оборудования тепловой электростанции», 16.005 «Специалист по эксплуатации котлов, работающих на твердом топливе», 16.012 «Специалист по эксплуатации котлов на газообразном, жидком топливе и электронагреве», 20.022 «Работник по оперативному управлению тепловыми сетями», 20.023 «Работник по расчету режимов тепловых сетей», 20.024 «Работник по ремонту оборудования, трубопроводов и арматуры тепловых сетей», 20.025 «Работник по эксплуатации оборудования, трубопроводов и арматуры тепловых сетей», 16. «Специалист по эксплуатации трубопроводов и оборудования тепловых сетей», 16.064 «Инженер-проектировщик тепловых сетей», 19.011 «Специалист по управлению балансами и поставками газа»)
<i>педагогическая деятельность:</i>		

P7	осуществлять педагогическую деятельность в области профессиональной подготовки	Требования ФГОС ВО, СУОС ТПУ (ПК-11), Критерий 5 АИОР (пп.1.1, 1.2, 1.5), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI, требования профессионального стандарта 01.004 «Педагог профессионального обучения, профессионального образования и дополнительного профессионального образования», утвержденный приказом Министерства труда и социальной защиты Российской Федерации от 8 сентября 2015 г. № 608н (зарегистрирован Министерством юстиции Российской Федерации 24 сентября 2015 г., регистрационный № 38993)
<i>Универсальные компетенции</i>		
P8	мыслить абстрактно, обобщать, анализировать, систематизировать и прогнозировать, принимать решения в сложных инженерных задачах с технической неопределенностью и недостатком информации	Требования ФГОС ВО, СУОС ТПУ (УК-1, ОК-1, ОК-2), Критерий 5 АИОР (п. 1.3), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
P9	использовать творческий потенциал, саморазвиваться, самореализовываться	Требования ФГОС (УК-6, ОК-3), Критерий 5 АИОР (п. 1.4), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
P10	использовать иностранный язык для эффективного взаимодействия в профессиональной сфере	Требования ФГОС ВО, СУОС ТПУ (УК-4, УК-5, ОПК-3), Критерий 5 АИОР (п. 1.5), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
<i>Профиль 4</i>		
P14	применять современные методы и средства практической инженерной деятельности в автоматизированных системах управления технологическими процессами в теплоэнергетике и теплотехнике	Требования ФГОС ВО, СУОС ТПУ (УК-1, УК-2, ПК-6, ПК-10), Критерий 5 АИОР (п. 1.5), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI, требования профессиональных стандартов (40.012 Профессиональный стандарт «Специалист по метрологии», 40.057 Профессиональный стандарт «Специалист по автоматизированным системам управления производством», 40.061 Оператор-наладчик автоматических линий

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Школа Инженерная школа энергетики  
Направление подготовки 13.04.01 Теплоэнергетика и теплотехника  
Отделение школы (НОЦ) НОЦ И.Н. Бутакова

УТВЕРЖДАЮ:  
Руководитель ООП  
П.А. Стрижак  
(Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

### ЗАДАНИЕ на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

магистерской диссертации
(бакалаврской работы, магистерской диссертации)

Студенту:

Группа	ФИО
5БМ74	Бойковой Тамаре Сергеевне

Тема работы:

<b>Исследование влияния способов монтажа первичных измерительных преобразователей на качество работы АСУ пароперегревателем энергетического котла</b>	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	06.05.2019 №3502/с

Срок сдачи студентом выполненной работы:	2.06.2019
--	-----------

### ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

<b>Исходные данные к работе</b>	Исследуемыми параметрами являются: расход – 1400 т/час, давление – 25,1 МПа и температура – 565 °С. Регулируемым параметром является температура перегретого пара, допустимые отклонения от + 5 до - 10 °С. В качестве регулирующего устройства используется микропроцессорный контроллер.
---------------------------------	--

<b>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</b>	1) обзор опубликованных работ, связанных с темой способов повышения качества работы автоматизированной системы регулирования температуры перегретого пара; 2) проектная разработка автоматической системы регулирования температуры перегретого пара климатической камеры; 3) определение динамических характеристик термоэлектрических преобразователей; 4) расчет переходных процессов автоматической системы регулирования; 5) выбор технических средств автоматизации системы управления пароперегревателем; 6) разработка конструкторской документации; 7) финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение; 8) социальная ответственность; 9) заключение по работе.
<b>Перечень графического материала</b>	1) схема функциональная; 2) схема принципиальная электрическая; 3) схема монтажная; 4) чертеж щитовой конструкции.
<b>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы</b> (с указанием разделов)	
<b>Раздел</b>	<b>Консультант</b>
Основной раздел	Иванова Евгения Владимировна Доцент НОЦ И.Н. Бутакова ИШЭ
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Киселева Елена Станиславовна Доцент ОСГН ШБИП
Социальная ответственность	Куликова Ольга Александровна Доцент ООД ШБИП
<b>Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:</b>	
Введение, обзор теоретических работ, методика параметрического синтеза системы регулирования	

<b>Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику</b>	
---	--

**Задание выдал руководитель:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент НОЦ И.Н. Бутакова ИШЭ	Иванова Е.В.	к.ф.-м.н.		
ст. преп. НОЦ И.Н. Бутакова ИШЭ	Атрошенко Ю. К.	к.т.н.		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5БМ74	Бойкова Тамара Сергеевна		

## Реферат

Выпускная квалификационная работа 141 с., 24 рисунка, 38 таблиц, 90 источников.

Ключевые слова: автоматизированная система управления пароперегревателем, автоматическая система регулирования температуры перегретого пара, переходный процесс, передаточная функция объекта, динамические характеристики системы.

Объектом исследования является пароперегреватель котельного агрегата. Цель работы – исследование влияния инерционности системы «термоэлектрический преобразователь – защитная гильза» на качество работы системы регулирования температуры перегретого пара.

В процессе работы выполнен анализ опубликованных научных работ, определены динамические характеристики термопреобразователей с помощью численного моделирования, определены постоянные времени датчика температуры при изменении способа установки его в гильзу, построены переходные процессы, по которым определены прямые оценки качества. Выполнен выбор оборудования, разработана проектная и конструкторская документация.

В работе рассмотрена автоматизированная система управления пароперегревателем, которая включает в себя автоматическую систему регулирования температуры перегретого пара.

В результате выполнения выпускной квалификационной работы (ВКР) разработана методика расчета системы регулирования температуры с учетом фактических условий монтажа датчиков температуры, которая позволит снизить продолжительность работы оборудования при повышенных температурах, что повысит его надежность и срок службы, а также предотвратит возникновение аварийных ситуаций. Результаты работы могут использоваться при расчете и наладке АСР температуры перегретого пара на тепловых электрических станциях, и при выполнении научно-исследовательских работ.



### Перечень обозначений и сокращений

ТЭП – термоэлектрический преобразователь;

ТПС – термопреобразователь сопротивления;

ТП – термopара;

АСУ – автоматизированная система управления;

АСР – автоматическая система регулирования;

ПП – пароперегреватель;

ПК – персональный компьютер;

МПК – микропроцессорный контроллер;

ПУ – пусковое устройство;

ИМ – исполнительный механизм;

ТЭС – тепловые электрические станции;

ЭИМ – электрический исполнительный механизм;

$t_{пп}$  – температура перегретого пара;

СО – станция оператора;

ЩСА – щит системы автоматизации.

## Оглавление

Введение .....	11
1 Способы повышения качества работы автоматизированной системы регулирования температуры перегретого пара .....	13
2 Методика параметрического синтеза системы регулирования .....	17
3 Автоматическая система регулирования температуры перегретого пара ...	20
4 Определение динамических характеристик термоэлектрических преобразователей с использованием методов численного моделирования ....	25
5 Расчет переходных процессов автоматической системы регулирования температуры перегретого пара .....	34
6 Выбор технических средств автоматизированной системы управления пароперегревателем .....	39
7 Разработка проектной и конструкторской документации .....	48
8 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение ...	59
9 Социальная ответственность .....	83
Заключение .....	97
Список использованных источников .....	99
Приложение А Study on the influence of the method for installation of primary measuring transducers on the quality of ACS operation with a superheater of a power boiler .....	108
Приложение Б Расчет статических и динамических характеристик системы .....	121
Приложение В Построение переходных процессов и оценка качества работы системы .....	132
Приложение Г Заказная спецификация приборов и средств автоматизации .....	138
Графический материал:	на отдельных листах
ФЮРА.421000.004 С2 Схема функциональная	
ФЮРА.421000.004 Э3 Схема электрическая принципиальная	
ФЮРА.421000.004 С4 Схема монтажная	
ФЮРА.421000.004 СБ Общий вид щита управления	

## Введение

На сегодняшний день почти все предприятия функционируют с участием автоматизированных систем управления. Такие системы необходимы для производства большого объема продукции, облегчения труда людей и поддержания надежности работы оборудования.

Одними из стратегически важных являются предприятия энергетического сектора, так как отвечают за жизнеобеспечение жилищно-коммунального сектора и объектов социальной сферы. Технологические процессы на ТЭС и других объектах генерации энергии характеризуются, как правило, высокими значениями параметров, требующих точного контроля и регулирования. Одним из таких параметров является температура. Измерение температуры занимает до 50 % от общего числа измерений, это важный показатель для контроля процессов, анализа как технических, так и экономических показателей производства, а также для определения надежности и долговечности работы оборудования при различных условиях.

Температура перегретого пара является одним из технико-экономических показателей, так как оказывает влияние на КПД. Однако верхний предел температуры перегретого пара ограничен прочностными характеристиками материалов, а потому требует поддержания на определенном уровне [1...3]. Влияние превышения расчетного значения температуры на надежность работы оборудования [1] обусловлено возможным изменением в структуре металла, утонением труб, развитием микротрещин, что приводит к появлению локальных порывов и впоследствии к отказам оборудования в целом [4, 5].

Требования к надежности связаны с прочностными характеристиками металла поверхностей нагрева котла. При воздействии высоких температур (до 600 °С) сталь теряет свою несущую способность, как следствие наступившей температурной пластичности, происходит потеря прочности и переход из упругого состояния в упруго-пластичное [6, 7].

Большое влияние на ресурс работы оборудования имеет не только превышение допустимого значения измеряемой величины, но и продолжительность работы оборудования в условиях повышенных температур. Превышение температурой пара расчетных значений в течение нескольких часов приводит к потере ресурса поверхностей нагрева котла, эквивалентного нескольким месяцам эксплуатации при нормативных параметрах. Качественная работа автоматической системы регулирования обеспечивает надежность работы агрегатов, предотвращает деформацию металла и порывы, а также способствует увеличению срока службы металла оборудования.

При измерении температуры перегретого пара на станциях используют термоэлектрические преобразователи (ТЭП). Для защиты чувствительного элемента ТЭП и удобства монтажа датчика используют защитные гильзы. Так как при установке датчика температуры в гильзу, между ними образуются зазоры, оказывающие влияние на инерционность измерительного канала температуры, и, как следствие, системы регулирования в целом [8], то для заполнения защитной гильзы используют буферные материалы, минимизирующие тепловую инерцию, тем самым увеличивая скорость реакции системы на изменение температуры. В этом случае интерес представляет оценка влияния способа установки датчика на характеристики работы АСР температуры перегретого пара.

Целью работы является исследование влияния инерционности системы «термоэлектрический преобразователь – защитная гильза» на качество работы системы регулирования температуры перегретого пара.

Для этого необходимо решить следующие задачи:

- 1) выполнить анализ опубликованных научных работ по теме исследования;
- 2) выполнить численную оценку динамических характеристик ТЭП в зависимости от способа монтажа датчиков;
- 3) выполнить расчет параметров настройки регулятора и переходных процессов в АСР  $t_{\text{пп}}$  для различных условий монтажа датчиков;
- 4) разработать комплект проектной и конструкторской документации.

## 1 Способы повышения качества работы автоматизированной системы

### регулирования температуры перегретого пара

Проблемам повышения качества работы систем регулирования температуры перегретого пара посвящены работы исследователей Белорусского национального технического университета (Кулаков Г.Т., Горелышева М.Л. [8]), Национального исследовательского университета «МЭИ» (Горайнова В.В. [9, 10]), Института Энергетики Академии наук Молдовы (Журавлев А.А., Шит М.Л. [11]), Российского государственного университета им. А.Н. Косыгина (Коньков Д.И., Захаркина С.В., Власенко О.М. [12]), Волжского политехнического института (Трушников М.А. [13]), научного центра московской компании ОАО «ОРГРЭС» (Холщев В.В. [14]), а также работы Кузнецова С.С, Себиной Л.П., Колесниковой О.В., Просоедова Р.А. [15, 16] и многих ученых Китая [17...21].

Основным рассматриваемым вопросом является исследование влияния относительной постоянной времени объекта, связанной с высокой инерционностью объекта, на качество регулирования температуры перегретого пара [17...19, 22]. В данных работах в качестве решения предлагается использование прогностических моделей. При моделировании рассчитывают системы с ПИ- и ПИД-регулятором в условиях реального объекта. Уменьшение значения относительной постоянной времени объекта при отработке внешнего возмущения приводит к уменьшению относительного времени появления максимальной динамической ошибки регулирования от общего относительного времени регулирования и улучшает производительность системы управления. Также, в статье [22] по разработанным моделям определяется длительность нагрева чувствительных элементов в зависимости от условий технологических процессов, необходимых для достижения температуры термопары в пределах допустимого отклонения от номинальной статической характеристики для трех типов термопар – К, L и S. Тем самым, использование прогностических

моделей помогает не только прогнозировать изменение параметра регулирования, но и оценить эффективность регулирования.

В [11] разработан новый метод компенсации инерционности сигналов от термопар и измерительных каналов расхода пара на температуру пара после пароперегревателя (функциональной зависимости температуры пара на выходе пароперегревателя от расхода пара). Использование методов инерционности сигналов термопар в пароперегревателе и инерционности сигнала расхода пара, позволяет сократить длительность переходных процессов до 2 раз.

В работах [9, 13, 15, 16, 23] описываются способы регулирования температуры перегретого пара, путем изменения расхода топлива, либо изменения способа охлаждения. Рассматривается корректировка соотношения «топливо – вода», эффективные способы охлаждения пара (регулирование температуры перегретого пара) [13]. В [16] алгоритм регулирования основан на методе каскадного управления с коррекцией ошибок температуры на основе скорости изменения температуры пара после впрыска конденсата. Описана математическая модель парового охлаждения котла. Результаты моделирования показывают, что метод контроля температуры перегретого пара котла имеет хорошие качественные характеристики, что подразумевает эффективный контроль и уменьшение вероятности возникновения аварий.

В [14, 24] АСР температуры перегретого пара описывается методика выбора регулирующей арматуры и основные принципы оптимального управления, а также, разрабатывается комплексная математическая модель динамики барабанного парового котла с использованием системы автоматического управления. Модель дополнена основными контурами регулирования с типовыми алгоритмами управления. Определены основные взаимосвязи между контурами регулирования и исследована динамика их взаимодействия. Приведены результаты моделирования основных технологических параметров в виде переходных процессов.

Вопросы надежности, в частности, способы продления службы поверхностей металла посредством поддержания температуры перегретого пара и улучшения качества регулирования рассматриваются в статьях [12, 25, 26]. В [25] рассматриваются эффективно допустимые отклонения температуры от номинальных, способствующие минимальным потерям поверхностей нагрева котла и продлению его срока службы. Влияния качества регулирования на изменение срока службы металла рассмотрены в работе [26] посредством. Определены зависимость срока службы металла от величины дисперсии для разных марок сталей, а также численные значения увеличения срока службы металла пароперегревателя при переходе от ручного управления к типовой САР и при переходе от типовой к усовершенствованной САР. Изменение условий работы металла за счет улучшения качества регулирования приводит к существенному увеличению времени, которое остается до истечения срока службы поверхности нагрева пароперегревателя. В [12] особое внимание уделяется поддержанию температуры перегретого пара в заданных пределах вне зависимости от нагрузки котельного агрегата, а так как металл труб котельного агрегата находится в особенно тяжелых условиях работы, то повышение температуры выше допустимых значений может привести к аварии вследствие появления ползучести металла, повышенных тепловых расширений и ряда других причин. Для достижения поставленных целей в работе решаются задачи внедрения коррекции по температуре перед вторым впрыском, автоподстройка коэффициентов регулятора в зависимости от нагрузки котла.

Анализ перечисленных выше работ позволяет сделать вывод о том, что опубликовано довольно большое количество работ, в которых предложены способы решения проблемы регулирования температуры перегретого пара и поддержания ее на заданном уровне, но на данный момент нет работ, рассматривающих качество регулирования температуры пара с учетом динамических характеристик измерительных преобразователей температуры. Определение кривых разгона датчиков температуры, выполняется, как

правило, одновременно с определением динамических характеристик объекта регулирования [11], однако при замене датчика его характеристики могут измениться, что не учитывается при настройке регуляторов. Поэтому для оценки изменившихся динамических характеристик [27] целесообразно применять аппарат прогностического моделирования.



## 2 Методика параметрического синтеза системы регулирования

В общем случае под синтезом понимают нахождение структуры и параметров динамической системы. В более узком понимании под синтезом понимают нахождение алгоритма управляющего устройства, которое обеспечивает заданные характеристики системы [28]. При автоматизации технологических процессов, когда используются стандартные алгоритмы и серийные регуляторы, задача синтеза сводится к нахождению закона регулирования и его налаживания. В качестве исходных данных используются статические и динамические характеристики неизменной части системы, требования к системе, которая синтезируется. Первые могут быть представлены в виде экспериментально полученных кривых разгона или в виде передаточной функции объекта, полученной аналитически (например, на основе расчетных данных по характеристикам объекта или с помощью экспериментальных частотных характеристик (АЧХ, ФЧХ)).

При инженерном синтезе систем автоматического регулирования требуется обеспечить необходимую точность регулирования и приемлемый характер переходных процессов [29]. Решение первой задачи в большинстве случаев сводится к определению требуемого общего коэффициента усиления системы и вида корректирующих средств, повышающих точность системы. Решение второй задачи – обеспечение приемлемых переходных процессов – оказывается почти всегда более трудным вследствие большого числа варьируемых параметров. Поэтому существующие инженерные методы направлены, в основном, на решение второй задачи, так как считается, что обеспечение требуемой точности может быть достаточно просто сделано на основании использования существующих критериев точности и совершенствования их практически не требуется. В настоящее время для целей синтеза систем автоматического регулирования широко используются вычислительные машины, позволяющие производить полное или частичное моделирование проектируемой системы. При таком моделировании

становится возможным наиболее полно исследовать влияние различных факторов нелинейности, зависимость параметров от времени и т. п.

В качестве методов синтеза используются методы В. Я. Ротача, РАФЧХ, резонансной частоты, а также метод логарифмических амплитудных характеристик.

Сущность метода В. Я. Ротача [30, 31] заключается в том, что динамические свойства объекта задаются с помощью АФХ, которые определены экспериментально или аналитически. Качество регулирования задается с помощью показателя  $M$ . Частотный показатель колебательности  $M$  может быть принят в качестве меры запаса устойчивости. Задача расчета состоит в том, что нужно подобрать такие настройки регулятора, при которых АФХ разомкнутой системы касалась бы круга с заданным показателем колебаний (рис. 2.1).

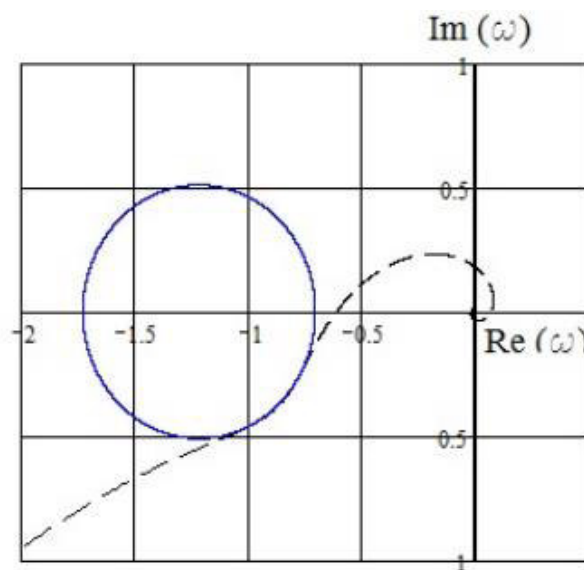


Рисунок 2.1 – Комплексная частотная характеристика разомкнутого контура и  $M$ -окружность

Наиболее просто такое построение выполнить для  $\Pi$ -регулятора, который не меняет фазных соотношений в системе, а меняет только масштаб. Меняя значения коэффициенту передачи регулятора строится АФХ разомкнутой системы. Если АФХ заходит в круг, то коэффициент уменьшается, в противном случае – увеличивается. После выполнения расчета

настроек регулятора строится переходной процесс в системе и определяются прямые показатели качества регулирования. Если они будут неудовлетворительными, то корректируются значения показателя колебаний  $M$  и расчеты повторяется. Данный метод также требует определенного количества итерационных процедур поиска, но дает удовлетворительные результаты с точки зрения запаса устойчивости.

Корневой метод параметрического синтеза систем автоматического управления основан на понятии расширенных амплитудно-фазочастотных характеристик (РАФЧХ) [29]. РАФЧХ какого-либо звена можно получить подстановкой в передаточную функцию этого звена  $W(P)$  оператора  $P = m \cdot \omega + i \cdot \omega$ , где  $m$  – запас устойчивости. Расчетные формулы обеспечивают получение границы заданной степени колебательности системы в пространстве параметров настройки регулятора.

Метод РАФЧХ базируются на:

- 1) использовании в качестве критерия, определяющего качество переходного процесса регулирования, степени затухания  $\psi$ ;
- 2) определении расширенных амплитудно-фазовых характеристик объекта и регулятора;
- 3) применении основного условия устойчивости системы.

Для ПИ-регулятора расчетные формулы дают в пространстве параметров настройки границу заданного запаса устойчивости. На границе ищут значения параметров настройки для регуляторов. Минимуму первого интегрального критерия соответствует максимум отношения  $Kp/Tu$ , минимуму второго интегрального критерия – точка  $0,95 \cdot \max(Kp / Tu)$  в сторону большего значения частоты (правее максимума).

При сравнении методов В.Я. Ротача и РАФЧХ можно сделать вывод о том, что метод расширенных частотных характеристик более простой и быстрый в применении, а также позволяет при этом получить достаточно высокую степень точности.

### 3 Автоматическая система регулирования температуры перегретого пара

В работе рассматривается автоматизированная система управления пароперегревателем, в состав которой входит автоматическая система регулирования температуры. Так как исследования направлены на исследование способов установки ТЭП в защитные гильзы, то большое внимание уделяется именно расчету АСР температуры перегретого пара.

Для регулирования температуры перегретого пара применяются различные системы регулирования. Рассмотрим одноимпульсную и двухимпульсную системы.

Одноимпульсная система АСР температуры перегретого пара представлена на рисунке 3.1.

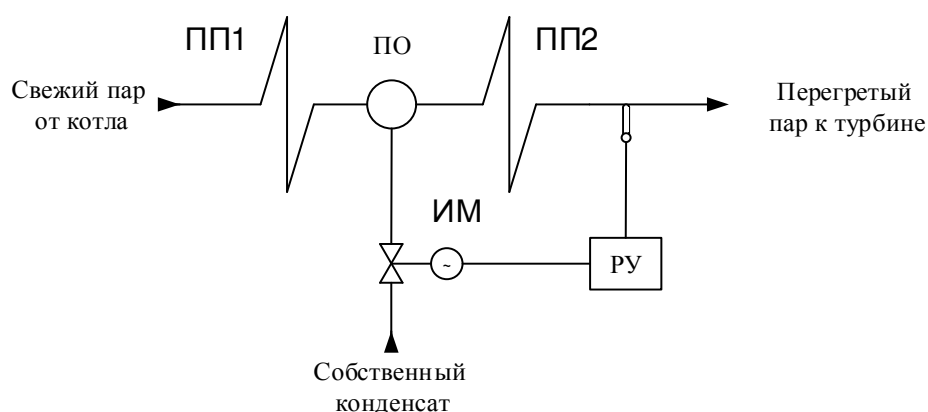


Рисунок 3.1 – Одноимпульсная система АСР температуры перегретого пара:  
ПП1, ПП2 – пароперегреватель, ПО – пароохладитель,  
ИМ – исполнительный механизм, РУ – регулирующий орган

На вход регулятора поступает сигнал, пропорциональный отклонению температуры перегретого пара от заданного значения. В зависимости от знака и величины отклонения температуры регулирующее устройство воздействует через ИМ на регулирующий орган, восстанавливая тем самым заданное значение температуры перегретого пара. Такое регулирование является одноимпульсным [32]. Однако, данная система применяется редко ввиду низкого качества регулирования. Главный недостаток такой АСР – возмущающие воздействия поступают на вход объекта регулирования в виде

изменения температуры пара на выходе пароперегревателя. С учетом инерционности рассматриваемого участка, отклонение выходной величины в переходных режимах может существенно превышать норму.

Двухимпульсная система АСР представлена на рисунке 3.2.

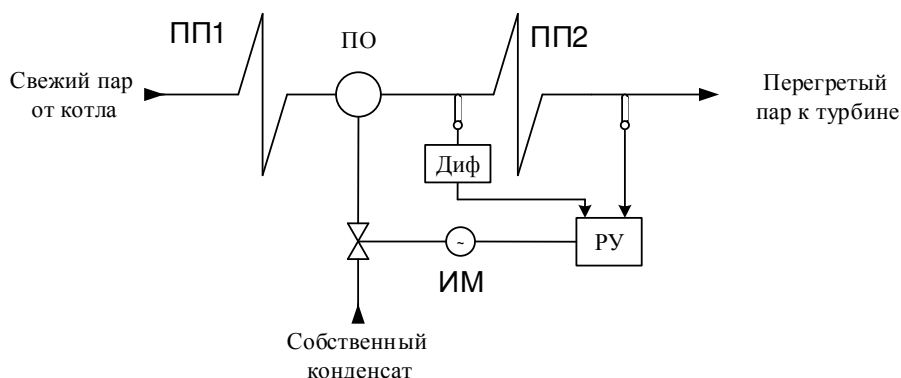


Рисунок 3.2 – Двухимпульсная система АСР температуры перегретого пара:  
 ПП1, ПП2 – пароперегреватель, ПО – парохладитель,  
 ИМ – исполнительный механизм, РУ – регулирующий орган, Диф –  
 дифференциатор.

Для улучшения качества переходного процесса при регулировании температуры пара применяется двухимпульсная система автоматического регулирования. Почти все возмущения, идущие со стороны предвключенных пакетов пароперегревателя в регулируемый участок, можно отфильтровать с помощью внутреннего малоинерционного контура, а с помощью внешнего инерционного контура обеспечивается поддержание температуры на заданном значении. Такая система может обеспечивать поддержание регулируемой величины на входе в участок пароперегревателя, а значит и более высокое качество регулирования параметра на выходе из перегревателя [33].

Регулирование температуры перегретого пара в пароперегревателе котла осуществляется методом впрыска «собственного» конденсата в парохладитель. Сначала впрыск выполняется за средними ширмами, далее – за крайними ширмами пароперегревателя. Для впрыска используется конденсат, получаемый в кожухотрубчатых конденсационных установках, установленных справа и слева от барабана. Охлаждение насыщенного пара,

идущего в конденсаторы из барабана, проводится питательной водой, которая прошла первую ступень водяного экономайзера.

Исследование качества работы АСУ пароперегревателя выполнено для парогенератора со следующими характеристиками: расход пара 1400 т/час, температура перегретого пара 565 °С, давление перегретого пара за паровой задвижкой 25,1 МПа.

Расчет выполнялся для системы регулирования с сигналом, характеризующим скорость изменения температуры пара в промежуточной точке. Рассматриваемая система имеет воздействие на температуру пара с помощью впрыскивающих пароохладителей [34].

Структурная схема АСР температуры перегретого пара показана на рисунке 3.3.

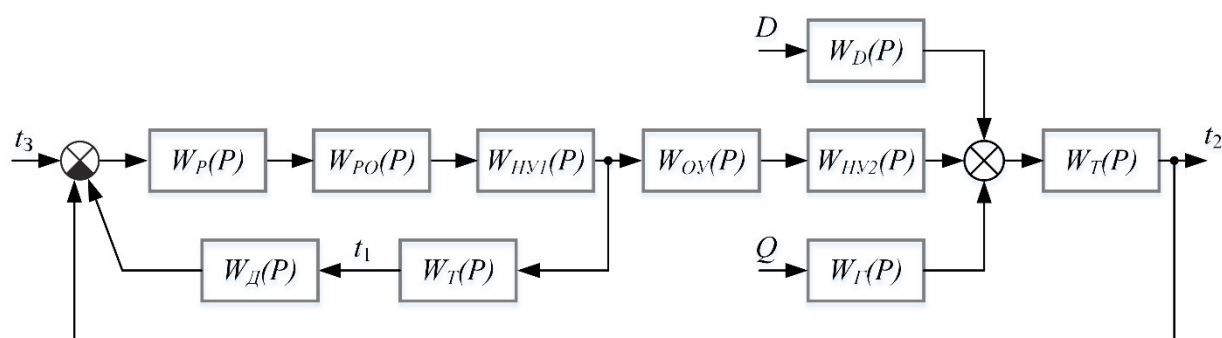


Рисунок 3.3 – Структурная схема АСР температуры перегретого пара

Таблица 3.1 – Перечень принятых обозначений рисунка 3.3

Обозначение	Описание	Функция
$W_p(P)$	Передаточная функция регулятора	$W_p(P) = k_p \left( 1 + \frac{1}{T_H \cdot P} \right)$
$W_{PO}(P)$	Передаточная функция регулирующего органа	$W_{PO}(P) = K_{PO}$
$W_{HV1}(P)$	Передаточная функция первого необогреваемого участка	$W_{HV1}(P) = \frac{T_2^{HV1} \cdot P + 1}{T_1^{HV1} \cdot P + 1}$
$W_{OY}(P)$	Передаточная функция обогреваемого участка	$W_{OY}(P) = \frac{K_{OY}}{T_{OY} \cdot P + 1} \cdot e^{-P \cdot \tau}$

Продолжение таблицы 3.1

Обозначение	Описание	Функция
$W_{HY2}(P)$	Передаточная функция последующих необогреваемых участков	$W_{HY1}(P) = \frac{T_2^{HY2} \cdot P + 1}{T_1^{HY2} \cdot P + 1}$
$W_T(P)$	Передаточная функция термоэлектрического преобразователя	$W_T(P) = \frac{K_T}{T_H \cdot P + 1}$
$W_D(P)$	Передаточная функция дифференциатора	$W_D(P) = \frac{k_d \cdot T_d \cdot P}{T_d \cdot P + 1}$
$W_D(P)$	Передаточная функция по каналу возмущения расходом пара	—
$W_T(P)$	Передаточная функция по каналу возмущения температурой газов	—
$t_1$ и $t_2$	Сигналы на выходе термоэлектрических преобразователей	—
$t_3$	Сигнал задания	—
$D$	Возмущение изменением расхода пара	—
$Q$	Возмущение изменением тепловосприятia	—

АСР температуры перегретого пара барабанного котлоагрегата должна отвечать техническим требованиям, а именно [35]:

- обеспечивать устойчивую работу автоматических регуляторов (следовательно, должны отсутствовать автоколебания), минимальное количество их включений (не более шести включений в минуту);
- поддерживать заданное значение температуры перегретого пара  $t_{пп}=565^\circ\text{C}$  на выходе из котла при номинальной нагрузке с отклонением менее 1 % от номинального значения температуры;
- допустимые отклонения температуры от  $+5$  до  $-10^\circ\text{C}$ ;
- при ступенчатом изменении нагрузки на 10 % от исходной номинальной, максимальное отклонение  $t_{пп} \leq \pm 8^\circ\text{C}$ .

Указанные требования предъявляются в условиях стационарного режима работы АСУ. В переходных режимах работы параметры могут иметь большое отклонение, в связи с чем необходимо принимать меры по их минимизации.

Параметры настройки регулятора напрямую зависят от статических и динамических характеристик объекта, а также от характеристик измерительных преобразователей. В основном, расчет регулятора состоит из

трех этапов: предварительный выбор, расчет параметров настройки, проверка устойчивости и обеспечение заданных требований [29].

Для рассматриваемой системы аналитически по конструктивным характеристикам определялись разгонные характеристики участков пароперегревателя котельного агрегата. Далее по полученным кривым разгона определялись динамические характеристики.

Для определения передаточной функции термоэлектрического преобразователя по номинальной статической характеристике определялся коэффициент передачи, а по кривой разгона – постоянная времени. На этапе расчета параметров настройки точное значение постоянной времени ( $T_u$ ) датчика определить невозможно, поэтому используют усредненное значение (как правило, 15 – 20 секунд). Зачастую это значение может отличаться от принятого вследствие использования защитных гильз, буферных материалов для их заполнения и различными условиями эксплуатации. Так как существенная разница в принятых и реальных значениях параметра  $T_u$  может оказывать влияние на параметры настройки регулятора, то появляется интерес исследования влияния  $T_u$  ТЭП на общие параметры настройки регулятора и качество переходных процессов регулируемой системы.

Расчет статических и динамических характеристик системы представлен в приложении Б.



## 4 Определение динамических характеристик термоэлектрических преобразователей с использованием методов численного моделирования

### 4.1 Способы установки ТЭП

Работа тепловых электрических станций предполагает большое количество точек измерения температуры [36, 37]. Так как термопреобразователи постоянно находятся в условиях высоких температур и давления, необходимо соблюдение специальных условий эксплуатации – установка их в защитные гильзы [38, 39]. Такой способ оказывает влияние на характеристики процесса измерения температуры, в частности, скорость реакции датчика на изменение значения и погрешность измерения [40, 41].

Главным условием достоверного измерения температуры является равенство температур термопреобразователя и измеряемой среды. Передача теплоты между средами или телами происходит тремя способами – излучением, конвекцией и теплопроводностью. Если имеет место теплообмен между преобразователями и средой, температура спая не всегда будет равна температуре измеряемой среды. Эта погрешность зависит от конструкции термопреобразователя и особенностей его установки на объекте измерения, от условий теплообмена или от режима работы оборудования [42]. В связи с тем, что размеры трубопровода часто ограничены, на практике увеличивают длину термопреобразователя, устанавливая ее наклонно. Увеличение длины стержня термопреобразователя повышает термическое сопротивление и уменьшает погрешность.

При измерении температуры в трубопроводах с наружным диаметром  $D_n = 57 - 133$  мм удобна установка термоприемника, схема которой показана на рисунке 4.1, а. Этот способ установки может быть рекомендован для различных термоприемников [43]. Если внутренний диаметр трубопровода имеет недостаточный размер, то термоприемник может быть установлен наклонно к оси трубопровода, как показано на рисунке 4.1, б. При измерении температуры среды в трубопроводах, позволяющих обеспечить глубину

погружения термоприемника, он может быть установлен перпендикулярно относительно трубопровода (рисунок 4.1, в). Необходимым условием является то, что при установке датчика температуры, его чувствительный элемент должен совпадать с осью трубопровода. Также, при выборе способа установки необходимо учитывать, что коэффициент теплоотдачи больше при перпендикулярном омывании (рисунок 4.1, в), чем при наклонном (рисунок 4.1, б) или продольном (рисунок 4.1, а).

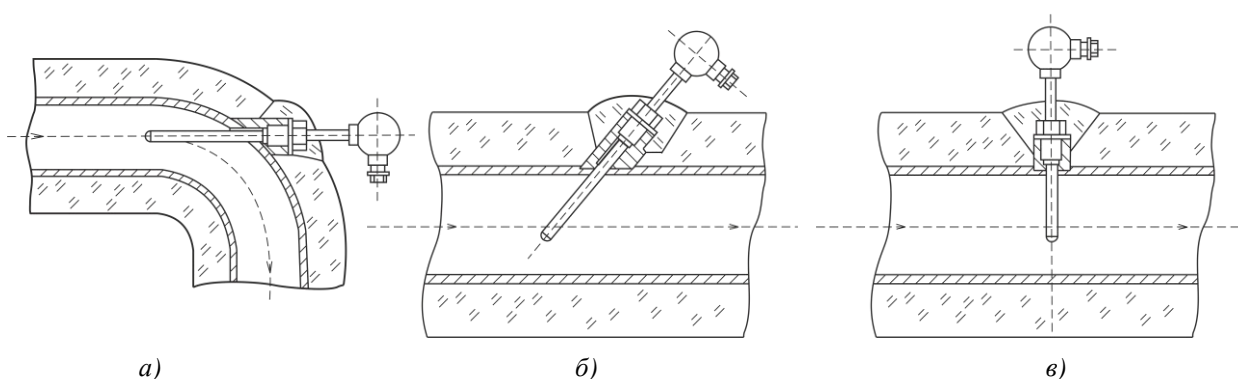


Рисунок 4.1 – Схема установки термопреобразователя: а) – вдоль оси трубопровода; б) – наклонно; в) – перпендикулярно относительно трубопровода

Температурные датчики редко вводятся непосредственно в технологическую среду. Так как среда может быть коррозионно-опасной или находиться под высоким давлением, чувствительные элементы устанавливаются в защитные гильзы. Защитные гильзы представляют собой металлические трубки, установленные в технологическом сосудах или трубопроводах и становятся герметичной неотъемлемой частью трубопровода или технологического сосуда. Они позволяют быстро и легко демонтировать первичный преобразователь с технологической установки для калибровки или замены без необходимости останавливать технологический процесс. Наиболее распространенными типами защитных гильз являются резьбовые, сварные и фланцевые. Защитные гильзы классифицируются по способу их присоединения к технологическому оборудованию. Например, резьбовая

защитная гильза ввинчивается в технологическое оборудование; приварная защитная гильза приваривается к отводному патрубку под сварку, а ввариваемая защитная гильза приваривается непосредственно к технологической трубе или сосуду. Фланцевая защитная гильза имеет фланцевое кольцо, которое крепится к фланцу на технологическом сосуде или трубопроводе [44].

Установка в защитную гильзу может быть выполнена в различных вариантах: с воздушным зазором или с заполнением различными теплопроводящими веществами.

Выбор буферных материалов основывается на условиях эксплуатации системы «термоэлектрический преобразователь – защитная гильза», где данный материал будет использоваться для заполнения свободного пространства [45]. Заполняться свободное пространство может следующими веществами: медная стружка, кварцевый песок, масло (трансформаторное, силиконовое, моторное), термопаста. Из указанных материалов для заполнения защитных гильз при их эксплуатации в тракте пароперегревателя могут использоваться медная стружка и песок, так как их температура плавления выше значения температуры перегретого пара [46, 47]. Масла используются при температурах до 250 °С, термопаста применяется, как правило, в диапазоне температур до 300 °С [47].

## 4.2 Физическая и математическая модели теплопереноса в чувствительном элементе датчика температуры

Для анализа влияния используемых способов установки датчиков используют математические модели, что упрощает процесс исследования влияния различных факторов на параметры работы системы измерения.

В случаях установки датчиков температуры в защитные гильзы, необходимо учитывать наличие зазоров между ТЭП и гильзой [48], появление которых обусловлено разными габаритами термопар и конструктивными размерами гильз. В зависимости от величины зазоров и выбранного материала, заполняющего гильзу, будет меняться показатель инерционности системы «ТЭП – защитная гильза» [49]. На рисунке 4.2 показан способ установки чувствительного элемента ТЭП в защитной гильзе.

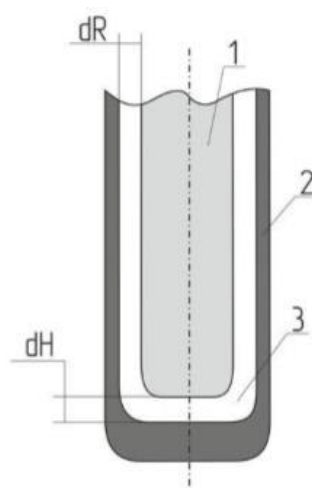


Рисунок 4.2 – Размещение чувствительного элемента в защитной гильзе:

1 – чувствительный элемент ТЭП, 2 – защитная гильза, 3 – свободное пространство, dR-кольцевой зазор, dH-вертикальный зазор

Показанному на рисунке 4.2 участку ТЭП соответствует схема области решения задачи теплопереноса (рис. 4.3). Область 5 (рис. 4.3) может представлять собой как воздушный зазор, так и зазор, заполненный теплопроводящим материалом. Заполнение свободного зазора может осуществляться различными веществами, подобранными в зависимости от условий эксплуатации, главным из которых является максимальная измеряемая температура среды.

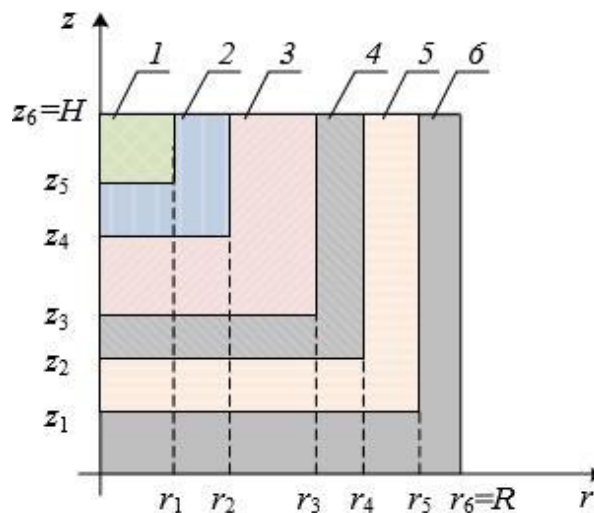


Рисунок 4.3 – Области решения задач:

1 – спай термопары; 2 – керамический наконечник; 3 – порошок оксида алюминия; 4 – чехол ТЭП; 5 – заполняющий материал; 6 – защитная гильза

Теплофизические характеристики материалов и веществ в области решения задачи теплопереноса приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Теплофизические характеристики материалов [46, 47]

Наименование элемента	Коэффициент теплопроводности $\lambda$ , Вт/(м·К)	Удельная теплоемкость $c$ , Дж / (кг·К)	Плотность $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>
Спай термопары типа Е (ХКн)	22,5	435	8815
Керамический наконечник	1,5	1151	2300
Порошок Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	16,57	1031	2765
Защитный чехол сталь 12Х18Н10Т	15	462	7900
Воздух	0,026	1190	1,161
Медная стружка	280,7	652,4	6188
Защитная гильза сталь 12Х18Н10Т	15	462	7900

Так как тип термопары (К, L, Е и т.д.) не оказывает значительного влияния на инерционность датчика промышленного исполнения [45], исследования выполнены для одной термопары – типа Е (ХКн).

Процесс теплопереноса для системы, показанной на рисунке 4.3 описывается системой дифференциальных уравнений.

$$c_1 \cdot \rho_1 \cdot \frac{\partial T_1}{\partial t} = \lambda_1 \cdot \left( \frac{\partial^2 T_1}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial T_1}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_1}{\partial z^2} \right), 0 < r < r_1, z_5 < z < H, \quad (4.1)$$

$$c_2 \cdot \rho_2 \cdot \frac{\partial T_2}{\partial t} = \lambda_2 \cdot \left( \frac{\partial^2 T_2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial T_2}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_1}{\partial z^2} \right), \quad 0 < r < r_2, \quad z_4 < z < z_5; \quad r_1 < r < r_2, \quad z_5 < z < H, \quad (4.2)$$

$$c_3 \cdot \rho_3 \cdot \frac{\partial T_3}{\partial t} = \lambda_3 \cdot \left( \frac{\partial^2 T_3}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial T_3}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_3}{\partial z^2} \right), \quad 0 < r < r_3, \quad z_3 < z < z_4; \quad r_2 < r < r_3, \quad z_4 < z < H, \quad (4.3)$$

$$c_4 \cdot \rho_4 \cdot \frac{\partial T_4}{\partial t} = \lambda_4 \cdot \left( \frac{\partial^2 T_4}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial T_4}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_4}{\partial z^2} \right), \quad 0 < r < r_4, \quad z_2 < z < z_3; \quad r_3 < r < r_4, \quad z_3 < z < H, \quad (4.4)$$

$$c_5 \cdot \rho_5 \cdot \frac{\partial T_5}{\partial t} = \lambda_5 \cdot \left( \frac{\partial^2 T_5}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial T_5}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_5}{\partial z^2} \right), \quad r_4 < r < r_5, \quad z_2 < z < H, \quad (4.5)$$

$$c_6 \cdot \rho_6 \cdot \frac{\partial T_6}{\partial t} = \lambda_6 \cdot \left( \frac{\partial^2 T_6}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial T_6}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_6}{\partial z^2} \right), \quad 0 < r < r_6, \quad 0 < z < z_1; \quad r_5 < r < r_6, \quad z_1 < z < H. \quad (4.6)$$

Начальные условия определяют распределение температуры в чувствительном элементе ТЭП в начальный момент времени:

$$\begin{aligned} t = 0; \quad t = t_0; \quad 0 < r < R, \\ t = 0; \quad t = t_0; \quad 0 < z < H, \end{aligned} \quad (4.7)$$

где  $t_0 = 293$  К – начальная температура, соответствующая нормальным условиям.

Решение системы нестационарных дифференциальных уравнений, с соответствующими краевыми условиями выполнено методом конечных разностей [50]. Разностные аналоги дифференциальных уравнений решены локально-одномерным методом. Решение нелинейных уравнений выполнено методом простых итераций [50].

На границах области решения заданы граничные условия 4 рода (табл. 4.2).

Таблица 4.2 – Граничные условия для системы уравнений

Граничные условия	Граница области решения	Граничные условия	Граница области решения
$T_1(r_1, z) = T_2(r_1, z);$ $-\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial r} \Big _{r=r_1} = -\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial r} \Big _{r=r_1}$	$(z_5 < z < H);$	$T_1(r, z_5) = T_2(r, z_5);$ $-\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial r} \Big _{r=r_5} = -\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial r} \Big _{r=r_5}$	$(0 < r < r_1);$
$T_2(r_2, z) = T_3(r_2, z);$ $-\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial r} \Big _{r=r_2} = -\lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial r} \Big _{r=r_2}$	$(z_4 < z < H);$	$T_2(r, z_4) = T_3(r, z_4);$ $-\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial r} \Big _{r=r_4} = -\lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial r} \Big _{r=r_4}$	$(0 < r < r_2);$
$T_3(r_3, z) = T_4(r_3, z);$ $-\lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial r} \Big _{r=r_3} = -\lambda_4 \frac{\partial T_4}{\partial r} \Big _{r=r_3}$	$(z_3 < z < H);$	$T_3(r, z_3) = T_4(r, z_3);$ $-\lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial r} \Big _{r=r_3} = -\lambda_4 \frac{\partial T_4}{\partial r} \Big _{r=r_3}$	$(0 < r < r_3);$
$T_4(r_4, z) = T_5(r_4, z);$ $-\lambda_4 \frac{\partial T_4}{\partial r} \Big _{r=r_4} = -\lambda_5 \frac{\partial T_5}{\partial r} \Big _{r=r_4}$	$(z_2 < z < H);$	$T_4(r, z_4) = T_7(r, z_2);$ $-\lambda_4 \frac{\partial T_4}{\partial r} \Big _{r=r_2} = -\lambda_7 \frac{\partial T_7}{\partial r} \Big _{r=r_2}$	$(0 < r < r_4);$
$T_7(r_4, z) = T_5(r_4, z);$ $-\lambda_{1\backslash 4} \frac{\partial T_4}{\partial r} \Big _{r=r_4} = -\lambda_5 \frac{\partial T_5}{\partial r} \Big _{r=r_4}$	$(z_2 < z < z_2);$	$T_7(r, z_1) = T_6(r, z_1);$ $-\lambda_7 \frac{\partial T_7}{\partial r} \Big _{r=r_1} = -\lambda_6 \frac{\partial T_6}{\partial r} \Big _{r=r_1}$	$(0 < r < r_4);$
$T_5(r_5, z) = T_6(r_5, z);$ $-\lambda_5 \frac{\partial T_5}{\partial r} \Big _{r=r_5} = -\lambda_6 \frac{\partial T_6}{\partial r} \Big _{r=r_5}$	$(z_1 < z < H);$	$T_5(r, z_1) = T_6(r, z_1);$ $-\lambda_5 \frac{\partial T_5}{\partial r} \Big _{r=r_1} = -\lambda_6 \frac{\partial T_6}{\partial r} \Big _{r=r_1}$	$(r_4 < r < r_5);$
$T = T_r$	$(z = 0);$	$\frac{\partial T}{\partial z} = 0$	$(r = 0);$
$\frac{\partial T}{\partial r} = 0$	$(z = H);$	$T = T_r$	$(r = R);$

#### 4.3 Результаты расчетов постоянной времени

При определении динамических характеристик измерительного канала температуры определялись значения постоянной времени системы «термоэлектрический преобразователь – защитная гильза» с использованием групп моделей теплопереноса в указанной системе.

С помощью описанной математической модели в комплексе Matlab выполнен расчет кривых разгона ТЭП для различных значений вертикального  $dH$  и кольцевого  $dR$  зазоров (рис. 4.2) при заполнении кварцевым песком и без заполнения (воздушный зазор). По кривым разгона определялась постоянная времени ( $T_u$ ), которая характеризует монотонный процесс и определяет время, через которое выходная величина достигнет требуемого значения [29, 51]. Значение ( $T_u$ ) объекта можно определить из графика кривой разгона, для этого из точки перегиба кривой разгона от скачкообразного возмущения необходимо провести касательную до пересечения с линией установившегося значения [52]. Определение постоянной времени показано на рис. 4.4. На рис. 4.5 представлены полученные разгонные характеристики ТЭП для различных способов установки.

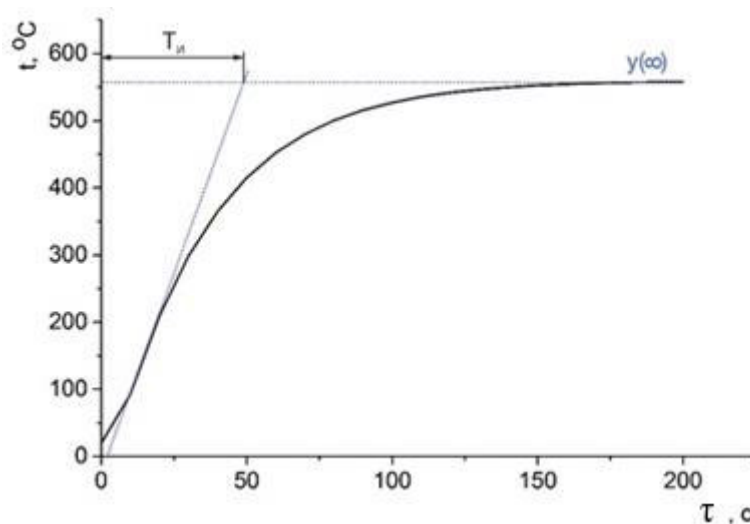


Рисунок 4.4 – Определение постоянной времени по кривой разгона ТЭП  $\tau$



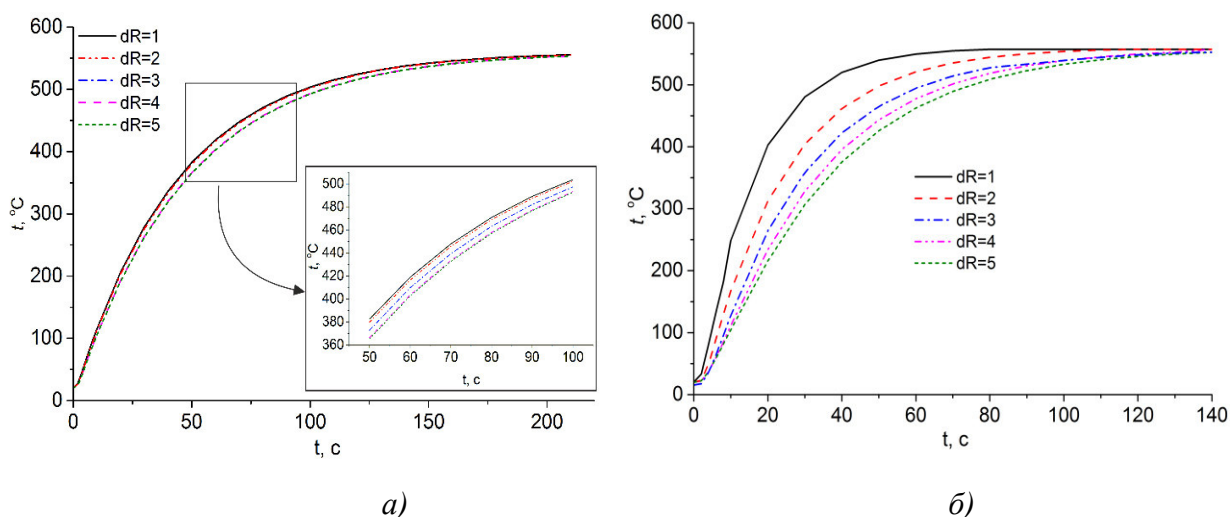


Рисунок 4.5 – Разгонные характеристики ТЭП, установленного в защитную гильзу, в условиях наличия воздушного зазора (а) и при заполнении гильзы кварцевым песком (б)

После серии расчетов получены значения постоянных времени, представленные в таблице 4.3.

Таблица 4.3 – Показатель постоянной времени при различных зазорах и заполняющих материалах

Толщина зазора, мм	Постоянная времени $T_u$ , с		Толщина зазора, мм	Постоянная времени $T_u$ , с	
	Кварцевый песок	Воздух		Кварцевый песок	Воздух
$dR=1, dH=1$	21	52	$dR=1, dH=1$	21	52
$dR=2, dH=1$	29	55	$dR=1, dH=2$	23	53
$dR=3, dH=1$	35	57	$dR=1, dH=3$	28	55
$dR=4, dH=1$	44	59	$dR=1, dH=4$	32	57
$dR=5, dH=1$	50	61	$dR=1, dH=5$	37	58

Из рисунка 4.5 и таблицы 4.3 видно, что на величину постоянной времени оказывает существенное влияние не только свойства буферного материала, заполняющего защитную гильзу, но и (в значительной степени) толщина кольцевого зазора между внутренней поверхностью гильзы и чувствительным элементом датчика температуры. По полученным значениям видно, что с увеличением кольцевого зазора в интервале от 1 до 5 мм рост значения постоянной времени в условиях воздушного зазора составляет 17 %, при использовании кварцевого песка – более чем в 2 раза. Также, видно, что

влияние толщины кольцевого зазора  $dR$  при постоянном значении вертикального существенно отражается на характере разгонных характеристик при заполнении гильзы кварцевым песком и в меньшей степени – в условиях наличия воздушного зазора. При варьировании вертикального зазора  $dH$  для фиксированной толщины кольцевого зазора ( $dR=1$  мм) полученные кривые разгоны отличаются в меньшей степени, что приводит к менее заметным изменениям значений постоянной времени: увеличение  $dH$  при использовании кварцевого песка от 1 до 5 мм приводит к росту  $T_u$  в 1,7 раза, а для условий воздушного зазора наблюдается увеличение на 12 %.

## 5 Расчет переходных процессов автоматической системы регулирования температуры перегретого пара

Для достижения целей исследования расчет параметров настройки выполнялся следующим образом. Сначала определились параметры настройки регулятора с использованием усредненных динамических характеристик термопарных датчиков, затем параметры регулятора рассчитывались с учетом динамических характеристик измерительных преобразователей, учитывающих способ установки датчика и влияние внешних факторов (буферные материалы, заполняющие гильзу). После этого численно определялись переходные процессы в системе регулирования температуры перегретого пара с использованием полученных параметров настройки регулятора для моделей объекта и датчиков, учитывающих влияние гильзы и заполняющих материалов на динамические характеристики первичных преобразователей.

Расчет выполнен с помощью инженерного математического программного обеспечения MathCad. Для различных способов установки и различных регуляторов были получены параметры настройки  $k_p$  и  $T_u$  ПИ-регулятора (табл. 5.1).

Таблица 5.1 – Оптимальные параметры настройки ПИ-регулятора

Толщина зазора, мм	Характеристики, полученные при расчете с паспортными параметрами				Характеристики, полученные при расчете с фактическими параметрами			
	$k_p$		$T_u$		$k_p$		$T_u$	
	песок	воздух	песок	воздух	песок	воздух	песок	воздух
$dR=1, dH=1$	62,65		44,75		60,8	58,2	45,08	69,80
$dR=2, dH=1$					53,5	59,4	49,79	72,35
$dR=3, dH=1$					52,7	60,8	54,28	74,68
$dR=4, dH=1$					54,7	61,9	62,09	76,69
$dR=5, dH=1$					56,9	62,8	67,42	78,43

Из таблицы 5.1 можно сделать вывод о том, что увеличение  $dR$  в интервале от 1 до 5 мм приводит к росту значения  $T_u$  в 2,4 раза для случая заполнения гильзы кварцевым песком. В условиях наличия воздушного зазора (без буферного материала) увеличение постоянной времени системы «термоэлектрический преобразователь – защитная гильза» составляет 17 % при изменении  $dR$  в том же диапазоне. Таким образом зависимость постоянной времени  $T_u$  от толщины зазора  $dR$  носит нелинейный характер и в большей степени прослеживается при заполнении гильзы кварцевым песком. При варьировании вертикального зазора  $dH$  для фиксированной толщины кольцевого зазора ( $dR=1$  мм) полученные кривые разгона отличаются в меньшей степени, что приводит к менее заметным изменениям значений постоянной времени: увеличение  $dH$  при использовании кварцевого песка от 1 до 5 мм приводит к росту  $T_u$  в 1,7 раза, а для условий воздушного зазора наблюдается увеличение на 12 %. Такие зависимости обусловлены тем, что увеличение бокового зазора в большей степени увеличивает прогреваемый буферный слой по сравнению с изменением вертикального зазора (площадь нижней плоскости чувствительного элемента несравнимо меньше площади его боковой поверхности).

В приложении В приведен пример расчета АСР температуры перегретого пара.

Расчетные переходные процессы в системе регулирования температуры перегретого пара, полученные для случаев использования в

качестве буферных материалов при монтаже ТЭП кварцевого песка и в условиях наличия воздушного зазора, а также для различных величин зазора между датчиком и гильзой, приведены на рисунках 5.1 – 5.3. На всех рисунках приняты обозначения:  $y_1$  – переходный процесс в АСР, параметрический синтез регулятора в которой выполнен с использованием динамических характеристик датчиков температуры, учитывающих фактические условия их монтажа;  $y_2$  – переходный процесс в АСР, параметрический синтез регулятора в которой выполнен с использованием усредненных динамических характеристик датчиков.

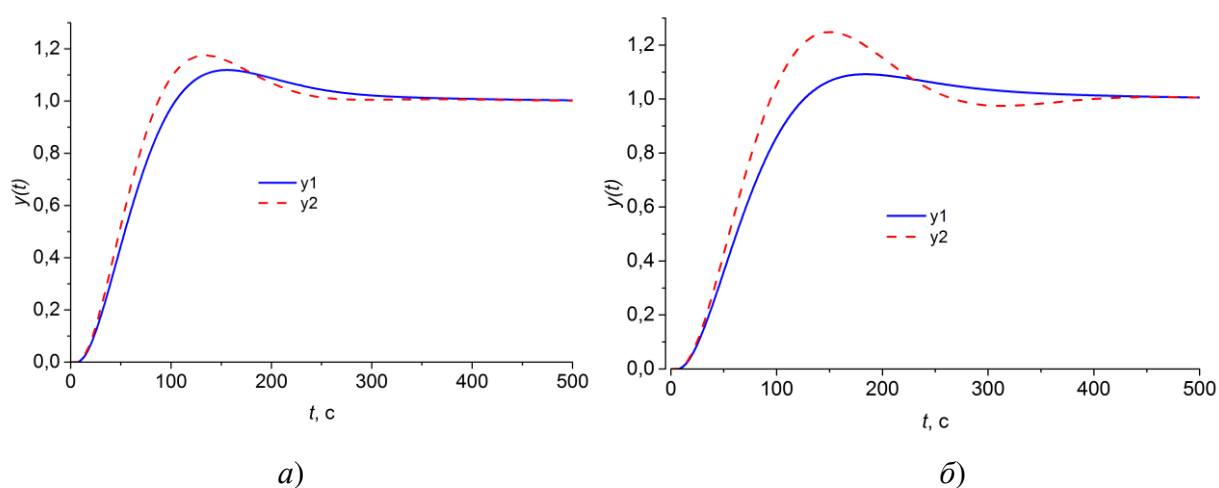


Рисунок 5.1 – Переходные процессы в АСР температуры перегретого пара (монтаж ТЭП в гильзу с использованием кварцевого песка с величиной  $dR=3$  мм (a) и  $dR=5$  мм (б))

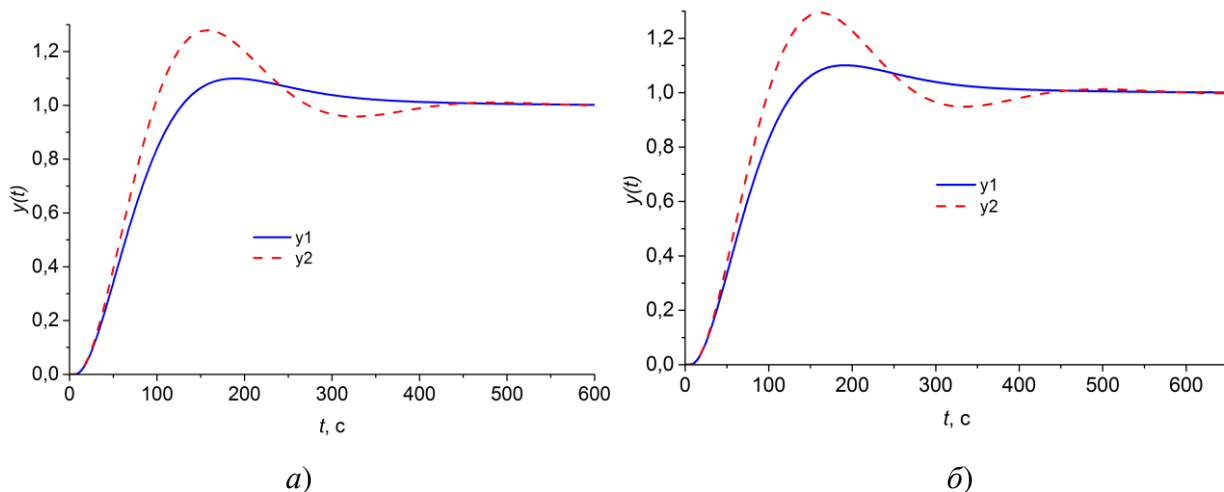


Рисунок 5.2 – Переходные процессы в АСР температуры перегретого пара (монтаж ТЭП в гильзу в условиях наличия воздушного зазора толщиной  $dR=3$  мм (а) и  $dR=5$  мм (б))

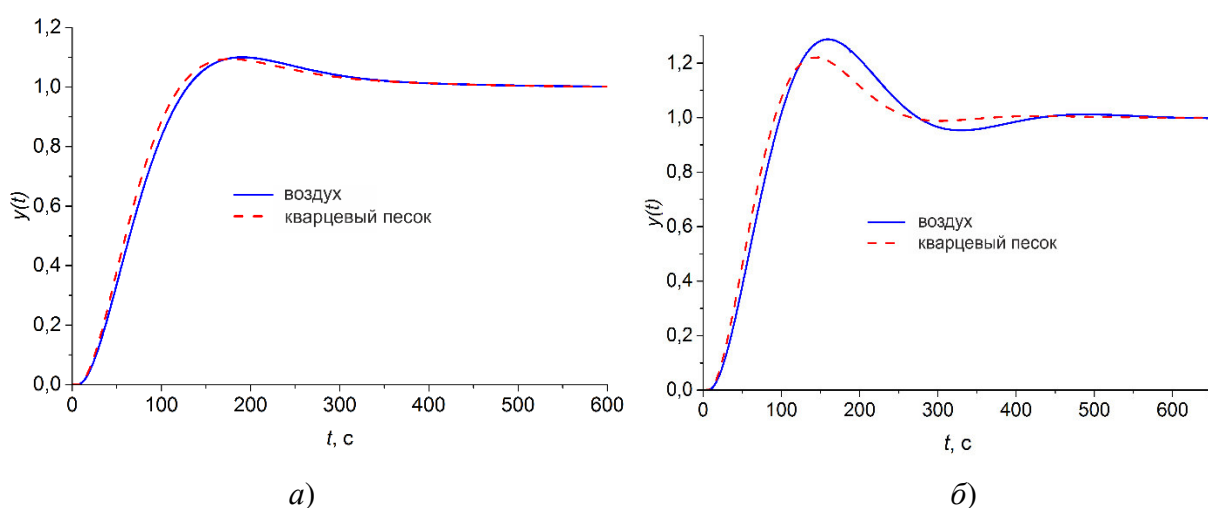


Рисунок 5.3 – Переходные процессы в АСР температуры перегретого пара для регулятора, учитывающего фактические условия установки ТЭП (а) и для регулятора, параметры настройки которого рассчитаны для усредненных динамических характеристик ТЭП (монтаж ТЭП в гильзу,  $dR=4$  мм)

По полученным переходным процессам были рассчитаны прямые оценки качества. Сравнительный анализ приведен в таблице 5.2.

Таблица 5.2 – Прямые оценки качества переходных процессов

Оценка качества	Для переходных процессов, представленных на рисунках					
	Рис. 5.1а	Рис. 5.1б	Рис. 5.2а	Рис. 5.2б	Рис. 5.3а	Рис. 5.3б
Динамическая ошибка	0,18	0,22	0,28	0,29	0,1	0,29
	0,11	0,09	0,1	0,1	0,09	0,22
Перерегулирование, %	18	22	28	28	10	29
	11	9,5	10	10	9	22
Время регулирования, с	211	230	248	256	281	252
	240	259	278	279	259	230
Степень затухания переходного процесса	1	0,9	0,9	0,8	1	0,8
	1	1	1	1	1	0,9
Динамический коэффициент регулирования	118	122	128	129	110	129
	111	100	110	110	109	122

Примечание: верхние значения в таблице соответствуют переходным процессам  $y_2$ , нижние – переходным процессам  $y_1$ .

Из рисунков 5.1–5.3 видно, что для АСР, расчет параметров настройки регуляторов в которой выполнен с использованием динамических характеристик измерительных преобразователей температуры, учитывающих фактические условия монтажа датчиков, перерегулирование существенно снижается. При этом происходит незначительное увеличение времени регулирования (5–10 %), которое в настоящей работе определялось как время, требуемое для достижения выходной величиной значения, находящегося в зоне в пределах 5 % от установившегося значения. Видно, что разница между переходным процессом  $y_1$  и  $y_2$  увеличивается с ростом толщины зазора  $dR$  и проявляется в большей степени при монтаже термоэлектрического преобразователя в гильзу без использования буферных материалов. Перерегулирование в переходных процессах  $y_1$ , в среднем, ниже на 10–65 % по сравнению с характеристиками процесса  $y_2$  при сопоставимых значениях времени переходного процесса (отличие в пределах 10 %).

## 6 Выбор технических средств автоматизированной системы управления пароперегревателем

Регулируемым параметром в автоматизированной системе регулирования является температура. Необходимо не только измерять данный параметр, но и вовремя отреагировать на возможные изменения, а также предотвратить возможные появления отклонений от нормы в работе, чтобы избежать возникновения аварийных ситуаций. Поэтому вопрос выбора средств измерения температуры является особенно важным. Кроме значений температуры не менее важными является значения давления и расхода перегретого пара. Также предстоит рассмотреть и выбрать программируемый логический контроллер (ПЛК), пусковое устройство (ПУ) и исполнительный механизм (ИМ).

### 6.1 Выбор датчиков температуры

Основные критерии правильного выбора термопреобразователей:

- измеряемые температуры должны соответствовать рабочим диапазонам измерений датчиков температуры;
- прочность корпуса датчика должна соответствовать условиям эксплуатации;
- при работе на взрывопожароопасных участках необходимо наличие взрывозащищенного исполнения.

Рассмотрим датчики температуры разных производителей и типов.

#### 1) Термопреобразователи Элемер типа ТП-2088

Данные термопреобразователи предназначены для измерения температуры жидких, газообразных сред (в том числе агрессивных, которые не разрушают защитную арматуру изделия) и твердых тел в различных отраслях промышленности [53]. Технические характеристики термопреобразователей типа ТП-2088 представлены в таблице 6.1.

Таблица 6.1 – Технические характеристики преобразователей типа ТП-2088

НСХ	Давление измеряемых температур, °С	Класс допуска	Количество рабочих спаев	Материал защитной оболочки
ХА (К)	-40...+850	1 или 2	1 или 2	12Х18Н10Т (АISI 321)
ХК (L)	-40...+600	2		
НН (N)	-40...+850	1 или 2		
ЖК (J)	-40...+750			

## 2) Термопреобразователи типа ТХАУ Метран-271МП

Термопреобразователи микропроцессорные предназначены для измерения температуры газообразных и жидких сред, где материал защитной арматуры может подвергаться коррозии. Они могут применяться на взрывоопасных участках, где возможно появление взрывоопасных паров, газов и смесей. Чувствительный элемент первичного термопреобразователя и микропроцессорный преобразователь, встроенный в головку датчика, преобразуют измеряемую величину (температуру) в унифицированный выходной токовый сигнал, поэтому не требуется дополнительных нормирующих преобразователей для построения АСУ [54]. Технические характеристики термопреобразователей серии Метран-271 МП представлены в таблице 6.2.

Таблица 6.2 – Общие технические характеристики термопреобразователей серии Метран-271 МП

Тип и исполнение термопреобразователя	НСХ	Выходной сигнал, мА	Диапазон преобразуемых температур, °С	Зависимость выходного сигнала от температуры
ТХАУ Метран-271 МП	К	4...20 20...4	-40...800 -40...1000	линейная
ТХАУ Метран-271 МП-Exia				
ТХАУ Метран-271 МП-Exd				

На основании приведенных параметров выбран термопреобразователь температуры Метран-271 МП, т.к. он удовлетворяет предъявляемым требованиям: имеет подходящий диапазон преобразуемых температур, точность измерения выше, чем аналогичный показатель датчика типа Элемер



ТП–2088, в качестве выходного сигнала вырабатывает унифицированный токовый сигнал, что позволяет не использовать дополнительные нормирующие преобразователи температуры.

## 6.2 Выбор преобразователя давления

К датчику измерения давления перегретого пара в пароперегревателе предъявляются следующие требования:

- 1) пределы измерения давления 0...25 МПа;
- 2) класс точности – не ниже 0,5;
- 3) контролируемая среда – пар, температура от 0 до плюс 565 °С.

Рассмотрим следующие варианты измерительных преобразователей для измерения избыточного давления (от 0 до 100 МПа), которые подходят по вышеперечисленным требованиям:

- 1) преобразователи давления серии «Метран»;
- 2) преобразователи серии «Сапфир».

Оба вида преобразователей подходят, так как имеют сравнительно близкие метрологические и надежность характеристики, однако, датчики давления серии «Метран» значительно дешевле. В связи с этим в работе выбраны преобразователи серии «Метран». Один из самых распространенных измерительных преобразователей, используемых на промышленных объектах, является малогабаритный датчик Метран-150 ТГ, который предназначен для преобразования давления рабочих сред (жидкости, пара, газа, газообразного кислорода и кислородосодержащих) в унифицированный токовый выходной сигнал. Основные технические характеристики Метран-150 ТГ приведены в таблице 6.3 [55].

Таблица 6.3 – Технические характеристики Метран-150 ТГ

Параметр	Характеристика
Температура окружающего воздуха	от минус 40 до плюс 80 °С
Верхний предел измерения	25 МПа
Электрическое питание	10,5 – 42,4 В
Блоки питания	22БП-36

### Продолжение таблицы 6.3

Параметр	Характеристика
Нагрузочное сопротивление	от 0,05 до 1,1 кОм
Потребляемая мощность	1 Вт
Степень защиты от воздействия пыли и воды	IP65
Выходной сигнал	4...20 мА

Выбор обусловлен простотой конструкции, надежностью, малыми габаритами, невысокой стоимостью датчика Метран-150 TG и другими преимуществами:

- возможность самодиагностики при запуске;
- встроенный фильтр радиопомех;
- микропроцессорная электроника;
- широкая линейка специальных исполнений, в том числе погружных зондов, обеспечивает возможность измерений давления и уровня, в условиях высокого давления, высокой температуры измеряемой среды.

### 6.3 Выбор технических средств измерения расхода

Для измерения расхода используется метод переменного перепада давления. В трубопровод устанавливается сужающееся устройство (СУ) и по разности давлений до и после СУ определяется расход. При измерении расхода пара в качестве СУ обычно используется сопло, так как по сравнению с диафрагмами они менее чувствительны к коррозии, загрязнениям и обеспечивают несколько большую точность измерения. Для установки сопла на выходе тракта пароперегревателя необходимо, чтобы его условный диаметр сопла был не менее 200 мм, и был рассчитан на условное давление до 20 МПа. Перепад давления, образующийся в СУ, по импульсным трубам передается на измерительный преобразователь, где измеряется и преобразуется в унифицированный электрический сигнал.

Для стабилизации верхних уровней конденсата, а также для снижения погрешности измерений в обеих соединительных линиях вблизи сужающего

устройства устанавливаются уравнительные конденсационные сосуды из нержавеющей стали с условным давлением до 10 МПа.

В данной системе класс точности датчиков давления должен быть не менее 0,5. Требуемый класс точности могут обеспечить современные преобразователи разности давлений, к примеру, Элемер-100-ДД и Rosemount 3051S-CD. Преобразователи имеют практически идентичные технические характеристики, но преобразователи разности давлений типа Элемер-100-ДД имеют меньшую погрешность и меньшую стоимость. Технические характеристики Элемер-100-ДД представлены в таблице 6.4 и в [56].

Таблица 6.4 – Технические характеристики Элемер-100-ДД

Параметр	Характеристика
Минимальный диапазон измерения перепада давления, кПа	0,04
Максимальный диапазон измерения перепада давления, МПа	16
Класс точности	0,5
Максимальное рабочее статическое давление, МПа	16, 25, 40
Выходные сигналы	4...20 мА

Таким образом, для измерения расхода выбран преобразователь разности давлений типа Элемер-100-ДД во взрывозащитном исполнении, рассчитанный на условное давление до 16 МПа, с выходным унифицированным токовым сигналом 4...20 мА.

#### 6.4 Выбор микропроцессорного контроллера

##### 1) Контроллер «Ремиконт» Р-130ISa

Данный контроллер принадлежит к группе модульных контроллеров, имеющих возможности резервирования модулей и плат, диагностики состояния контроллера, а также объединения в локальные сети по интерфейсным входам-выходам. Он также имеет возможность программирования на разных языках, операционную систему реального времени. Основные особенности контроллера Ремиконт Р-130ISa и его технические характеристики предложены в таблице 6.5.

Таблица 6.5 – Технические характеристики контроллера P-130ISa [57]

Параметр	Характеристика
Питание	224 В или 240 В AC; 24 В DC ( при отсутствии блока БП-1)
Максимальная потребляемая мощность	15 Вт
Аналоговые входы	унифицированные аналоговые сигналы постоянного тока 0...5, 0...20, 4...20 мА; 0...10 В
Цифровые (дискретные) входы	– логическая «1» напряжением от 19 до 32 В; – логический «0» напряжением от 0 до 7 В
Аналоговые выходы	унифицированные аналоговые сигналы постоянного тока 0...5, 0...20, 4...20 мА
Цифровые выходы	максимальное напряжение коммутации 40 В, максимальный ток нагрузки 0,3 А

Данный контроллер имеет подходящие характеристики, но достаточно высокую стоимость. Более дешевым и не менее подходящим, по сравнению с P-130ISa, по характеристикам является контроллер Siemens Simatic S7-300.

## 2) Контроллер типа Simatic S7-300

Микропроцессорные контроллеры серии Simatic S7-300 служат для выполнения задач, связанных с управлением и регулированием в небольших системах автоматизации [58]. Область применения данных контроллеров довольно обширна: начиная от решения простейших задач автоматизации и заканчивая серьезными задачами комплексной автоматизации. Эффективному применению данных контроллеров способствует наличие широкой гаммы центральных процессоров, модулей ввода-вывода дискретных и аналоговых сигналов, функциональных и коммуникационных модулей, модулей блоков питания и интерфейсных модулей.

Семейство микропроцессорных контроллеров серии Siemens Simatic S7-300 включает в свой состав [58]:

– несколько типов центральных процессоров Siemens различной производительности (CPU 312, 314, 315-2, 317-2);

– широкую гамму модулей ввода-вывода дискретных и аналоговых сигналов Siemens (SM 331, 332, 334).

Центральный процессор CPU 312 со встроенным интерфейсом MPI для построения небольших систем управления, включающих в состав системы локального ввода-вывода до 8 сигнальных, функциональных и коммуникационных модулей, рабочая память – 32 Кбайт. Имеет встроенных 10 дискретных входов, и 8 дискретных выходов. Технические характеристики модуля ввода аналоговых сигналов представлены в табл. 6.6 и в [58].

Таблица 6.6 – Технические характеристики модуля ввода аналоговых сигналов SM 331

Свойства	Модуль ввода аналоговых сигналов
Число входов	8 входов в 4 группах каналов
Разрешающая способность	– 9 битов + знак – 12 битов + знак – 14 битов + знак
Вид измерения	– Напряжение – Ток – Сопротивление – Температура

На основании приведенных технических характеристик выбран контроллер Simatic S7-300 с центральным процессором CPU 312 и модулем аналоговых входов SM 331, так как такой центральный процессор имеет достаточное количество встроенных входов-выходов, имеет возможность подключения аналоговых сигналов без использования нормирующего преобразователя.

## 6.5 Исполнительный механизм

Исполнительные механизмы – это приводные части регулирующего органа (задвижки, клапана и т.д.), выполняющие функцию перемещения этих органов. В зависимости от рода используемой энергии, исполнительные механизмы можно разделить на следующие группы: электрические, пневматические, гидравлические (реже всего использующиеся).

Наибольшее распространение в сфере автоматизации получили электрические исполнительные механизмы. В общем случае такой исполнительный механизм состоит из следующих элементов: электропривода и редуктора, датчика указателя положения, узла обратной связи и конечных выключателей. Исполнительные механизмы, в зависимости от назначения, могут включать в свой состав различные датчики положения: реостатные с диапазоном (0...120 Ом), индуктивные либо токовым со стандартными диапазонами (0...5 мА, 4...20 мА, 0...20 мА). Электрические исполнительные механизмы разделяют на виды: однооборотные электрические механизмы (МЭО), однооборотные фланцевые электрические механизмы (МЭОФ), прямоходные механизмы постоянной скорости (МЭП), прямоходные кривошипные механизмы переменной скорости (МЭПК).

Для выбора исполнительного механизма условно принимается диаметр трубопровода  $D_y = 100$  мм. Далее проводится расчет максимального крутящего момента.

При выборе ИМ типа МЭО должно выполняться условие  $M_H > M_{max}$ , поэтому выбираем механизм электрический однооборотный типа МЭОФ–1000/10–0,25У–00 [59].

### 5.6 Выбор пускового устройства

Пускатели могут быть контактные (МКР-098, ПМЛ, ПМА, ПМЕ и др.) или бесконтактные (БУЭР). Ввиду того, что в современных ИМ типа МЭО применяются тихоходные электродвигатели с большим значением индуктивной составляющей в момент коммутации на контактах возникает электрическая дуга, которая быстро изнашивает контакты. Поэтому широкое применение получили бесконтактные пускатели.

Блок управления электродвигателям реверсивный БУЭР, предназначенный для бесконтактного управления электрическими исполнительными механизмами. Блок БУЭР1-30 предназначен для управления электрическим исполнительным механизмом (ЭИМ) с

однофазным электродвигателем. Так как выбранный ИМ имеет трехфазную схему подключения рассматривается блок БУЭРЗ-30. Технические характеристики БУЭРЗ-30М-00 представлены в таблице 6.7.

Таблица 6.7 – Технические характеристики БУЭРЗ-30М-00 [60]

Параметр	Характеристика
Входной сигнал от датчика положения	0...5 мА, 0...20 мА, 4...20 мА
Режим работы	повторно-кратковременный с продолжительностью включений до 25%
Электрическое питание	трехфазная сеть 220 В, 50 Гц
Потребляемая мощность	8 Вт
Степень защиты от воздействия пыли и воды	IP20

БУЭР имеет следующие преимущества:

- современная элементная база, обеспечивающая более высокую надежность;
- значительно меньшие габариты и вес;
- простоту в схемах подключения изделия.

Заказная спецификация приборов и средств автоматизации составляется по форме 1 ГОСТ 21.110–2013 [61] ко всем основным комплектам рабочих чертежей за исключением основных комплектов рабочих чертежей строительных конструкций.

Составление заказной спецификации выполняется на основании функциональной схемы ФЮРА.421000.004 С2 и на основании выбранных технических средств автоматизации. Заказная спецификация приборов и средств автоматизации представлена в приложении Г.

В перечень спецификации необходимо включать всё оборудование, изделия и материалы, которые предусмотрены чертежами соответствующего разрабатываемого проекта. Спецификации присваивается обозначение, в котором присутствуют обозначения соответствующего комплекта рабочих чертежей с шифром С.

## 7 Разработка проектной и конструкторской документации

### 7.1 Разработка структурной схемы

Разрабатываемая система АСУ пароперегревателем является трехуровневой, так как предполагает наличие станции оператора.

К управляющим функциям данной АСУ относятся:

- реализация и определение оптимального режима функционирования технологических агрегатов;
- поддержание соотношения между технологическими параметрами;
- логическое управление оборудованием;
- аварийное отключение.

Также к ней относятся информационные функции:

- сбор информации о состоянии оборудования и его технологических параметрах;
- ведение базы данных в режиме реального времени;
- расчет экономических и технических показателей производства.

На нижнем (полевом) уровне располагаются датчики (температуры, давления, расхода), исполнительные механизмы, задвижки. На данном уровне обеспечивается согласование сигналов датчиков с входами устройства управления, а вырабатываемые команды с исполнительными механизмами.

На среднем уровне размещен контроллер, его центральный процессор, блок аналоговых вводов. ПЛК получает информацию с оборудования и выдает управляющие команды на исполнительные механизмы, в соответствии с запрограммированным управлением.

На верхнем уровне находится станция оператора. На данном уровне ведется контроль хода технологического процесса, обеспечивается связь с нижним уровнем, представляется визуализация и диспетчеризация всего процесса.

Структурная схема автоматической системы управления пароперегревателем представлена на рисунке 7.1.



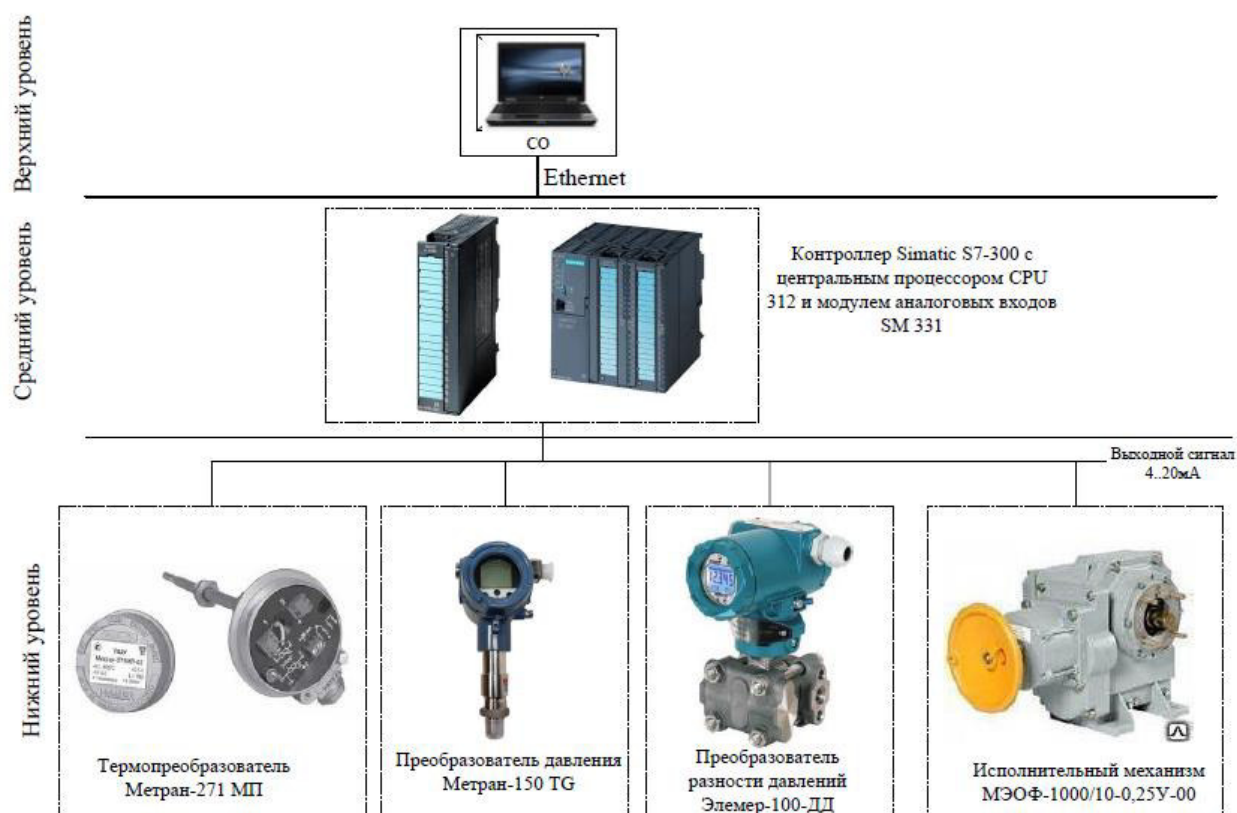


Рисунок 7.1 – Структурная схема АСУ пароперегревателем

На выходе регулируемого пакета пароперегревателя поступает информация о значении параметра от датчиков температуры, давления и преобразователя разности давлений. С датчика температуры также приходит значение параметра до регулируемого пакета пароперегревателя. Далее на контроллер поступает унифицированный токовый сигнал от датчиков. На пусковое устройство подается регулирующее воздействие с контроллера. Пусковое устройство предназначено для усиления сигнала для воздействия на исполнительный механизм. Регулирующий орган осуществляет регулирующее воздействие на пароохладитель изменением расхода впрыска собственного конденсата.

Датчики температуры, давления и расхода пара подключены к аналоговым входам соответствующего модуля контроллера, их связь со средним уровнем осуществляется с помощью токовой петли 4 – 20 мА. Исполнительный механизм управляется контроллером посредством цепей управления, подключенных к дискретным выходам модуля контроллера.

Связь среднего уровня с верхним осуществляется с помощью LAN-кабеля по протоколу Ethernet.

## 7.2 Разработка функциональной схемы

Функциональная схема (ФС) является одним из главных технических документов для систем автоматизации технологических процессов, определяющих структуру и характер данных систем.

При разработке функциональных схем учитывается характер процесса; условия пожаро- и взрывоопасности, токсичность окружающей среды и агрессивность; свойства измеряемой среды; расстояние от датчиков до места установки. Количество приборов, сигнализации и аппаратуры управления, установленных на оперативных щитах и пультах необходимо ограничивать, избыток аппаратуры усложняет эксплуатацию, сроки монтажных и наладочных работ. Приборы и средства вспомогательного назначения размещают на отдельных щитах, располагаемых в производственных помещениях вблизи технологического оборудования. На схеме представляется упрощенное изображение агрегатов, подлежащих автоматизации. Средства автоматизации и управления изображаются условными обозначениями по действующим стандартам, а также линии связи между ними. На функциональной схеме изображается технологическое оборудование в соответствии с ГОСТ 21.403 – 80 [62].

При разработке ФС автоматизации решаются следующие задачи:

- 1) получение первичной информации о состоянии технологического процесса;
- 2) воздействие на технологический процесс для управления им;
- 3) контроль и регистрация технологических параметров, процессов и состояния технологического оборудования;
- 4) стабилизация технологических параметров процесса.

В работе разрабатывается АСУ пароперегревателем барабанного котлоагрегата, это означает, что контролируется участок парового тракта

между точкой впрыска конденсата в пароохладитель и точкой контроля параметров после прохождения пакета пароперегревателя [63]. Так были определены местоположения точек отбора измерительной информации (табл. 7.1).

Таблица 7.1 – Местоположения точек отбора измерительной информации

Контролируемый параметр	БЩУ			По месту
	Постоянно	Сигнализация	Регистрация	
Температура пара перед встроенной задвижкой (до впрыска охлаждающей жидкости)	+	↑	+	
Температура перегретого пара за точкой смешения	+	↑	+	
Давление перегретого пара				+
Расход пара на турбину	+			

Разработка функциональной схемы выполняется в несколько этапов. На начальном этапе проводится определение и назначение каналов: канал 1 и 2 служат для определения температуры перегретого пара, канал 5 для определения давления перегретого пара за паровой задвижкой, канал 6 для определения расхода перегретого пара. Каналы 1, 2, 4, 5, 6 – измерительные, 3 – канал управления.

Функциональная схема АСУ пароперегревателем представлена на листе ФЮРА.421000.004 С2.

Информация о значении параметра поступает от датчика температуры 2а, датчика давления 5а и преобразователя разности давлений 6в на выходе регулируемого пакета пароперегревателя. До регулируемого пакета пароперегревателя также устанавливается датчик температуры 1а. На входной аналоговый модуль контроллера поступает унифицированный сигнал (4...20 мА). На пусковое устройство 3а подается регулирующее воздействие от дискретного модуля контроллера. Пусковое устройство предназначено для усиления сигнала для воздействия на ИМ. Основная задача системы регулирования – поддержание параметров на заданном уровне, а именно температура пара на входе пароперегревателя – 500 °С и температура пара на

выходе пароперегревателя – 565 °С. При этом давление перегретого пара должно быть 25,1 МПа, расход – 1400 т/ч. Для разработки функциональной схемы непосредственно использовалось справочное пособие [51].

### 7.3 Разработка принципиальной электрической схемы

Принципиальная электрическая схема представляет состав устройств и приборов, а также связей между ними. Действие данных устройств обеспечивает решение задач управления, защиты, регулирования, сигнализации и измерения. Электрическая схема является основанием для последующей разработки монтажной схемы, схемы внешних соединений.

Все приборы и аппараты в электрических схемах имеют позиционные обозначения, для этого применяют буквенно-цифровые обозначения. Линии связи состоят только из горизонтальных и вертикальных отрезков и имеют минимальное число взаимных пересечений. Типовые схемы подключения каждого прибора, элемента схемы в большинстве случаев берется из каталогов и инструкций по эксплуатации. Элементы и устройства, условные графические обозначения которых установлены в стандартах ЕСКД, изображают на схеме в виде условных графических обозначений.

На первом этапе разработки принципиальной электрической схемы выполняется расположение схем отдельных устройств и модулей. Затем производится соединение их друг с другом, согласно структурной схеме и руководствами по эксплуатации технических средств.

На основе выбранного оборудования разработана принципиальная электрическая схема, которая отображает взаимодействие приборов, их расположение и связь. Описан принцип действия всей системы, получение первичной информации, ее преобразование и выработка управляющего воздействия.

Обозначение устройств на принципиальной электрической схеме следующее:

А1 – микропроцессорный контроллер (МПК);

A1 S01 – входной модуль аналоговых сигналов МПК;  
A1 S02 – модуль дискретных сигналов МПК;  
A2 – пускатель бесконтактный реверсивный БУЭР3-30М-00;  
A3 – исполнительный механизм типа МЭОФ;  
A4, A5 – измерительные преобразователи температуры ТХАУ-Метран;  
A6 – датчик давления Метран-150-TG;  
A7 – преобразователь разности давлений Элемер-100-ДД;  
A8 – станция оператора;  
QF – выключатель автоматический;  
KQ – оптрон.

Принципиальная электрическая схема АСУ пароперегревателем представлена на листе ФЮРА.421000.004 ЭЗ, таблица с перечнем элементов на листе с шифром ФЮРА.421000.004 ПЭ.

При помощи измерительных преобразователей температуры A4, A5, датчика давления A6 и преобразователя разности давлений A7 происходит получение информации о значениях параметров технологического процесса. С выходов измерительных преобразователей унифицированный токовый сигнал 4...20 мА поступает на входной модуль аналоговых сигналов A1 S01 контроллера A1. После чего токовый унифицированный сигнал преобразуется в цифровой, далее он поступает на вход модуля дискретных сигналов S02. В этом модуле обрабатываются данные о ходе технологического процесса и вырабатываются управляющие воздействия по заданному алгоритму управления. На выход модуля дискретных сигналов A1 S02 подаются управляющие воздействия, усиливаются с помощью пускового устройства A2 и поступают на обмотку управления исполнительного механизма (ИМ) A3, после чего вал ИМ начинает вращаться, приводя в движение положение задвижки. Унифицированный токовый сигнал 4...20 мА с датчика положения выходного вала ИМ поступает на входной модуль аналоговых сигналов, дискретный сигнал с датчиков конечного положения ИМ поступает на входной модуль дискретных сигналов, что обеспечивает контроль положения

вала ИМ. Также функционирование технологического процесса отображается на рабочей станции оператора. Электропитание всех технических средств, кроме БУЭР-3-30, осуществляется от существующего поста распределительного переменным напряжением 220 В, 50 Гц. На БУЭР-3-30 подается напряжение 380 В, 50 Гц. Информация микроконтроллера А1 поступает на станцию оператора через Ethernet.

Оптрон КQ – электронный прибор, состоящий из излучателя света (светодиод) и фотоприёмника (фототранзисторов, фотодиодов), связанных оптическим каналом и, объединённых в общем корпусе. Принцип работы оптрона заключается в преобразовании электрического сигнала в свет, его передаче по оптическому каналу и последующем преобразовании обратно в электрический сигнал.

К измерительной части АСУ относятся датчики температуры, давления, расхода и т.д. Они имеют унифицированный токовый выходной сигнал. К информационно-управляющей части АСУ относится программируемый логический контроллер. Контроллер имеет аналоговый и дискретный модуль, блок питания. Принципиальная схема показывает подключение датчиков и различной аппаратуры к контроллеру, условное обозначение, расположение клеммных сборок. К исполнительной части АСУ относится исполнительный механизм типа МЭОФ.

#### 7.4 Разработка монтажной схемы

Монтажные схемы проектируются для выполнения электрической и других видов коммутации технических средств при монтаже систем автоматизации. Для сложных систем автоматизации отдельно выполняют монтажные схемы щитов и пультов управления, монтажные схемы внешних электрических и трубных проводок.

Монтажная документация, разрабатываемая в процессе проектирования систем автоматизированного управления, включает в себя:

- 1) монтажную документацию щитов и пультов;

2) монтажную документацию внешних электрических и трубных проводок.

На схеме условно изображаются технические средства, установленные по месту или непосредственно на технологическом оборудовании. В соответствии с технической документацией условно изображаются контакты элементов, их номера, соединения контактов.

Разработка монтажной схемы выполняется в несколько этапов, для начала размещаются технические средства, затем выбирается проводка, соединяющая данных средства. Далее проводится нумерация проводников, определение количества использованных жил и длина данных проводников до технических средств. Каждый проводник маркируется согласно принципиальной электрической схеме или вводится новая маркировка проводников. Для каждой внешней электрической проводки приводят ее техническую характеристику: количество жил, длину, марку, сечение, при необходимости количество занятых жил. Занятые жилы указываются в прямоугольнике, размещенном справа от обозначения кабеля. Для защитных труб приводят: диаметр, толщину стенки и длину.

Для электропроводок систем управления применяются изолированные провода и кабели с алюминиевыми и медными жилами. Преобразователи со щитом автоматизации соединяем кабелем КВВГ 4х1 – с медными жилами, изоляция и оболочка из поливинилхлоридного пластика, число жил 5 с сечением 1 мм<sup>2</sup>, экранированный, 1 жила – резервная.

Для линий питания выбираем кабели типа АКВВГ с алюминиевыми жилами сечением 1,5 мм<sup>2</sup>. Также на схеме использовано обозначение кабелей питания: 800 – для питания напряжением 220 В, 700 – для питания напряжением 24 В. Для информационных линий выбираем кабели типа КВВГ с сечением жил 1 мм<sup>2</sup>. Выбор кабелей отражен в таблице 7.2.

Таблица 7.2 – Характеристики кабелей АСУ

Марка	Число жил	Номинальное сечение, мм <sup>2</sup>
КВВГ	4	1
КВВГ	5	1
КВВГ	14	1
АКВВГ	4	1,5

Определяются диаметры используемых кабелей. Для КВВГ 5×1,0  $d = 5$  мм; для КВВГ 4×1,0  $d = 4$  мм; для КВВГ 14×1,0  $d = 14$  мм; для АКВВГ 4×1,5  $d = 6$  мм.

Определяется формула для расчета внутреннего диаметра защитной трубы:  $D \geq 1,4 \cdot d$ , где  $D$  – внутренний диаметр защитной трубы, мм;  $d$  - диаметр кабеля, мм.

Выбирается больший наружный диаметр трубы по ГОСТ 10.704–91 [64], с учетом толщины стенки  $\delta = 1,6$  мм.

Для кабеля АКВВГ 5×1,0:  $D \geq 1,4 \cdot 5 = 7$  мм, принимаем  $D = 10$  мм.

Для кабеля КВВГ 14×1,0:  $D \geq 1,4 \cdot 14 = 19,6$  мм, принимаем  $D = 24$  мм.

Для кабеля КВВГ 4×1,0:  $D \geq 1,4 \cdot 4 = 5,6$  мм, принимаем  $D = 10$  мм.

Для кабеля АКВВГ 4×1,5:  $D \geq 1,4 \cdot 6 = 8,4$  мм, принимаем  $D = 10$  мм.

Так как паровой котел подразумевает несколько систем управления, то для каждой системы необходимо предусмотреть устройства исполнительной части. Поэтому устанавливается отдельно шкаф пусковой аппаратуры, предназначенный для размещения пускателей других локальных систем регулирования парового котла. В шкафу пусковой аппаратуры предусмотрен транзитный клеммник ХТ2 в целях рациональной прокладки кабелей.

Монтажная схема разработанной АСУ представлена на чертеже ФЮРА.421000.004 С4.



## 7.5 Разработка чертежа щитовой конструкции

Щит системы автоматизации (ЩСА) предназначен для размещения средств контроля и управления технологическим процессом, контрольно-измерительных приборов, сигнальных устройств, аппаратуры управления, автоматического регулирования, защиты, блокировки линий связи между ними. Устанавливаются в производственных и специальных помещениях: операторских, диспетчерских, аппаратных и т.д. В щите расположены: контроллер типа Simatic S7–300, модуль аналоговых и дискретных сигналов, клеммники наборные, блок питания и выключатель автоматический.

Щит должен иметь наиболее эффективную конструкцию, а именно необходимые габаритные размеры, необходимые вырезы и крепления для установки приборов, средств автоматизации и вводов проводов.

Средства автоматизации и аппаратура управления комплектуется функциональными группами в порядке хода технологического процесса. Внутри каждого щита должно быть предусмотрено освещение.

В проекте для размещения средств автоматизации используется шкафной щит одиночный типа RITTAL 500x500x300, так как он имеет взрывобезопасное исполнение, может использоваться диапазон температуры окружающей среды от  $-30^{\circ}\text{C}$  до  $+80^{\circ}\text{C}$ , степень защиты IP 66 [66].

В ЩСА на высоте 270 мм на DIN-рейке размещен контроллер, к которому подводятся линии питания и информационная. Над модулями контроллера располагается блок питания и автоматический выключатель. Также в шкафу находятся клеммники наборные, и 5 сальниковых вводов.

Чертеж общего вида одиночного щита представлен на чертеже ФЮРА.421000.004 СБ и включает вид на внутренние плоскости и перечень составных частей.

## Заключение

В соответствии с техническим заданием на выполнение выпускной квалификационной работы выполнено исследование влияния инерционности системы «термоэлектрический преобразователь – защитная гильза» на качество работы системы регулирования температуры перегретого пара.

При определении динамических характеристик измерительного канала температуры определялись значения постоянной времени системы «термоэлектрический преобразователь – защитная гильза» с использованием групп моделей теплопереноса в указанной системе. Определено, что на величину постоянной времени оказывает существенное влияние не только свойства буферного материала, заполняющего защитную гильзу, но и толщина кольцевого зазора между внутренней поверхностью гильзы и чувствительным элементом датчика температуры. В результате работы получены зависимости постоянной времени от величины зазора и типа заполняющего гильзу материала для типичных способов установки и размеров чувствительных элементов датчиков.

В ходе исследования выполнен сравнительный анализ переходных процессов в рассматриваемой АСР, полученных при использовании параметров настройки регуляторов с учетом динамических характеристик фактически применяемой измерительной системы температуры и с учетом усредненных динамических характеристик, принятых на этапе параметрического синтеза регулятора.

Результаты расчета переходных процессов в системе на примере АСР температуры перегретого пара показали, что учет фактических условий монтажа первичных преобразователей позволяет снизить перерегулирование в системе в 1,1–2,8 раза, что может минимизировать продолжительность работы оборудования при повышенной температуре.

Предложенный в работе подход заключается в уточнении модели объекта и первичных измерительных преобразователей при настройке

регуляторов и может применяться в системах, использующих ПИ–, ПИД– и другие законы регулирования. Кроме того, описанная методика использования групп моделей теплопереноса может применяться не только в АСР температуры перегретого пара, но и других системах, использующих в качестве входных импульсов сигналы от датчиков температуры.

Для АСУ пароперегревателем выбраны технические средства автоматизации, разработан комплект проектной и конструкторской документации, включающий в себя трехуровневую структурную схему, принципиальную электрическую и монтажную схемы, а также чертеж щитовой конструкции.

При выполнении раздела «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение» были определены потенциальные потребители, первостепенными являются отрасли энергетики. При анализе конкурентоспособности можно выделить явное превосходство разработанного технического решения, относительно устоявшихся на рынке, благодаря увеличению надежности и продлению срока службы оборудования. Оценка абсолютной эффективности показала, что окупаемость проекта будет уже в первый год проведения работ.

В рамках раздела «Социальная ответственность» были определены вредные и опасные факторы. Согласно требований охраны труда, все эти факторы строго контролируются и регламентируются. В работе были предложены мероприятия по снижению воздействий на человека в процессе работы. Такие как: перерывы при длительной работе за компьютером; проветривание помещения; использование противошумных вкладышей, касок и специальных костюмов; выбор режимов работы оборудования и расположение рабочих мест.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ 18–38–00028.

## Список использованных источников

- 1 Atroshenko Y.K., Bychkova A.A., Andyk V.S. About influence of operational temperatures on reliability of operation of the equipment of thermal power plants. Matec Web of Conferences. – Vol. 72, 2016. – Article number 01006.
- 2 Алехнович А.Н. Высокотемпературная коррозия с участием соединений серы при ступенчатом сжигании угля. Энергетик. – № 11, 2011. – С. 34–36.
- 3 Тепловые и атомные электростанции: Учебные для вузов / Л.С. Стерман, С.А. Тевлин, А.Т. Шарков; Под ред. Л.С. Стерман. – 2-е изд., исп. и доп. – М.: Энергоиздат, 1982. – 456 с.
- 4 Автоматическое регулирование объектов теплоэнергетики: учебное пособие / Г. А. Липатников, М. С. Гузеев; Дальневосточный гос. технический ун-т (ДВПИ им. В. В. Куйбышева). - Владивосток: Изд-во ДВГТУ, 2007. – С. 225.
- 5 Каменецкий Б.Я. Высокотемпературная коррозия топочных экранов. Тяжелое машиностроение. – № 11-12, 2012. – С. 38–40.
- 6 Изотова Д.Е. Влияние высоких температур на прочность строительных материалов. Сборник статей. Самарский государственный технический университет. – Самара, 2017. – С.3.
- 7 Коррозия и износ поверхностей нагрева котлов: учебник / Отс А.А. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 272 с.
- 8 Кулаков Г.Т., Горелышева М.Л. Исследование влияния качества регулирования температуры перегретого пара на срок службы металла пароперегревателя котлов. Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений. – № 4, 2009. – С. 62–69.
- 9 Горяйнова В. В. Оптимизация автоматической системы регулирования температуры перегретого пара прямоточного котла / Радиоэлектроника, электротехника и энергетика, 2017. – С. 198.

10 Михайленко А.И., Щинников П.А. О необходимости совершенствования управления технологическими процессами на ТЭС в аварийных ситуациях. Сборник научных трудов VII Международной конференции «Электротехника. Электротехнология. Энергетика», г. Новосибирск, 2015. – С. 372–375.

11 Система автоматического регулирования температуры перегретого пара барабанного котла/ Журавлев А.А., Шит М.Л., Попонова О.Б., Шит Б.М., Зубатый А.Л.//Проблемы региональной энергетики, №1, 2006. – С.25–39.

12 Коньков Д.И., Захаркина С.В., Власенко О.М./ Система эффективного автоматического регулирования температуры пара на выходе из котла// Вестник ПНИПУ. Электротехника, информационные технологии, системы управления, №23, 2017. – С. 159 – 166.

13 Трушников М.А./ Исследование систем автоматического регулирования температуры перегретого пара в барабанном котле// Волжский политехнический институт, 2009. – 5 с.

14 Регулирование температуры перегретого пара / Холщев В.В. // Теплоэнергетика, №8, 2003. – С. 39 – 43.

15 Kuznetsov, S.S., Sebina, L.P., Ryzhkova, E.A. Regulating steam temperature in drum boilers by means of injection desuperheaters. initial investigation of the controlled object / Fibre Chemistry, № 45 (2), 2013. – С. 114 - 118.

16 Kolesnikova, O.V., Tsypkaikina, A.D., Prosoedov, R.A. Method of automation control of boiler steam temperature / International Russian Automation Conference, № 8501836, 2018.

17 Xu, H., Li, S., Zhang, L., Liu, H. Two-degree-of-freedom PID boiler steam temperature control method based on the internal model principle / Chinese Control Conference, №8483022, 2018. – С. 3420–3424.

18 Chen, W., Cen, L., Cao, A. Multiple-Model Internal Model Control of Main Steam Temperature with a Hybrid Model Scheduling Strategy / Chinese Control Conference, № 8483456, 2018. – С. 440–445.

- 19 Yang, X.-Y., Xu, D.-P., Liu, Y.-B., Han, X.-J. Study on strategy of superheated steam temperature control using multi-model predictive functions / Dongli Gongcheng / Power Engineering, № 25, 2005. – С. 537–540.
- 20 Yang, Z., Zhang, Y., Gao, W. Improved Model of an Intermediate Point Enthalpy Control System for Enhancing Boiler Efficiency / Journal of Energy Resources Technology, Transactions of the ASME, №141(2), 2019.
- 21 Chen, W., Cen, L., Cao, A. Multiple-Model Internal Model Control of Main Steam Temperature with a Hybrid Model Scheduling Strategy. Chinese Control Conference. – Article number 8483456, 2018. – P. 440–445.
- 22 Атрошенко Ю.К., Стрижак П.А. Определение необходимого времени измерений поверхностных термопар в зависимости от условий технологических процессов [Электронный ресурс]. – 2015. – Режим доступа: <http://www.ezproxy.ha.tpu.ru>. – Загл. с экрана.
- 23 Vijayalakshmi, V. Design of superheated steam temperature control using fuzzy logic controller / Engineering and Management, 2018. – С. 1076 – 1084.
- 24 Степанец, А. В. Аудит качества работы алгоритмов управления барабанных паровых котлов на стадии проектирования системы автоматизации / А. В. Степанец, Л. А. Коропова // Технологический аудит и резервы производства, 2015. – № 3(2). – С. 8 – 12.
- 25 Кузнецов С.С., Рыжкина Е.А. Качество автоматического регулирования температуры пара на котле ТП-87 / Дизайн, Технологии и инновации в текстильной и легкой промышленности, 2014. – С. 130–132.
- 26 Исследование влияния качества регулирования температуры перегретого пара на срок службы металла пароперегревателя котлов / Кулаков Г.Т., Горелышева М. Л.// Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений, № 4, 2009. – С. 62 – 69.
- 27 Стрижнев А.Г. Идентификация объекта управления по переходной характеристике замкнутой системы / А.Г. Стрижнев, А.В. Марков, А.Н. Русакович // Доклады БГУИР. – 2012. – № 5 (67). – С. 65–72.

28 Лазарева Т. Я., Мартемьянов Ю. Ф. Основы теории автоматического управления: Учебное пособие. 2-е изд., перераб. и доп. Тамбов: Изд-во Тамбовского государственного технического университета, 2004. – 352 с.

29 Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического управления. – Изд. 4, перераб. – СПб, Изд-во "Профессия", 2003. – 752 с.

30 Бурцева Ю. С. Беспойсковый метод расчета настроек регуляторов на минимум квадратичного критерия: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. – Москва, 2014. – 156 с.

31 Кухтик М.П., Макаров А.М. Расчет оптимальных параметров настройки ПИ – регулятора методической печи. Известия Волгоградского государственного технического университета. – № 5, 2017. – С. 70 –72.

32 Наладка средств автоматизации и автоматических систем регулирования: Справочное пособие/ А.С. Ключев, А.Т. Лебедев, С.А. Ключев, А.Г. Товарнов; Под ред. А.С. Ключева. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 368 с.

33 Жирнова М.Е., Григорьева М.М. Автоматическая система регулирования температуры перегретого пара парогенератора Е-270-13,8-510 [Электронный ресурс]. – 2015. – Режим доступа: <http://www.lib.tpu.ru>. – Загл. с экрана.

34 Кулаков Г.Т., Горелышева М.Л. Исследование влияния качества регулирования температуры перегретого пара на срок службы металла пароперегревателя котлов. Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений. – № 4, 2009. – С. 62–69.

35 Андык В. С. Автоматизированные системы управления технологическими процессами на ТЭС: учебник / В. С. Андык; Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ). – Томск: Изд-во ТПУ, 2016. – 407 с.

36 РД 153-34.1-35.104-2001 Методические указания по объему технологических измерений, сигнализации, автоматического регулирования

на тепловых электростанциях с ПГУ, оснащенных АСУ ТП. – М.: Служба передового опыта ОРГРЭС. – 2002. – 61 С.

37 Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации (утв. Приказом Минэнерго от 19.06.2003 г. № 229), Москва. – 180 С.

38 Иванова, Г.М. Теплотехнические измерения и приборы: учебник для вузов / Г.М. Иванова, Н.Д. Кузнецов, В.С. Чистяков. – Изд. 3-е, стер. – М.: Изд-во МЭИ, 2007. – 458 с.

39 Варгафтик Н. Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. – Изд. 3-е, стер. и испр. – М.: Старс, 2006. – 720 с.

40 Visualization Measurement of the Flame Temperature in a Power Station Using the Colorimetric Method / Mu H., Li Z., Han Z., Li J., Schlaberg H. I., Liu S., Liu S. // Energy Procedia, The 12th International Conference on Combustion & Energy Utilisation, Energy Procedia. – 2015. – Vol. 66. – P. 133-136.

41 ГОСТ 6616-94. Преобразователи термоэлектрические: общие технические условия. – 1995. – Москва, Изд-во стандартов. – 15 с.

42 Теплотехнические измерения и приборы: учебник для вузов/ Г.М. Иванова, Н.Д. Кузнецов, В.С. Чистяков. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Издательство МЭИ, 2005. – 460 с.

43 Теплотехнические измерения и приборы: учебник для вузов по специальности «Автоматизация теплоэнергетических процессов»/ В.П. Преображенский. – 3-е изд., перераб. – М.: «Энергия», 1978. – 704 с.

44 ПБ 03-585-03 Правила устройства и безопасной эксплуатации технологических трубопроводов. – М.: Госгортехнадзор России, 1998. – 8 с.

45 Атрошенко Ю. К., Стрижак П. А. О необходимых и достаточных временах измерений термоэлектрическими преобразователями с защитными гильзами. Датчики и системы. – № 5 (192), 2015. – С. 23–27.

46 Варгафтик Н. Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. – Изд. 3-е, стер. и испр. – М.: Старс, 2006. – 720 с.



- 47 Зиновьев Е.В. Теплофизические свойства металлов при высоких температурах. Справ. Изд. – М.: Металлургия, 1989. – 384 с.
- 48 Атрошенко Ю. К., Стрижак П. А. О влиянии защитной гильзы на погрешность измерения температуры термоэлектрическими преобразователями // Энергетик. – 2015. – № 10. – С. 52–55.
- 49 Боровкова, Т.В. Оценка точности измерения температуры термодарами при различных способах их размещения в объекте испытания / Т.В. Боровкова, В.А. Товстоног, В.Н. Елисеев // Инженерный журнал: наука и инновации. – 2013. – № 7. – С. 19.
- 50 Кузнецов Г.В. Разностные методы решения задач теплопроводности: учебное пособие / Кузнецов Г.В., Шеремет М.А. – Томск: ТПУ, 2007. – 172 с.
- 51 Воронов А. А., Титов В. К., Новогранов Б. И. Основы теории автоматического регулирования и управления: учебное пособие. – М.: Высшая школа, 1977. – 519 с.
- 52 Ерофеев А. А. Теория автоматического управления: учебник – СПб.: Политехника, 2008. – 302 с.
- 53 Датчики температуры: Каталог-справочник. – Москва: Изд-во НПП «Элемер», 2016. – 5 с.
- 54 Датчики температуры: Каталог-справочник. – Челябинск: Изд-во ПГ «Метран», 2018. – 312 с.
- 55 Каталог продукции ООО «Таганрогский котельный завод» [Электронный ресурс]. – 15 с. Режим доступа: <http://www.tenat-kz.ru/katalog.html> свободный. – Загл. с экрана.
- 56 Датчики дифференциального давления для измерения расхода. Каталог продукции Элемер – [Электронный ресурс]. – 12 с. Режим доступа: [http://www.elemer.ru/production/flowmeters/pressure\\_dd.php](http://www.elemer.ru/production/flowmeters/pressure_dd.php), свободный. – Загл. с экрана.

- 57 Малоканальный микропроцессорный контроллер Ремиконт Р-130-ISA: Руководство по эксплуатации ЯЛБИ.421457.001 РЭ. – Чебоксары, 2015. – 105 с.
- 58 Программируемый логический контроллер Simatic S7-300: Руководство по эксплуатации. – М.: ПЛК Системы, 2017. – 345 с.
- 59 Механизмы исполнительные электрические однооборотные МЭО: Номенклатурный каталог. – Чебоксары: Изд-во ЗЭиМ. – 25 с.
- 60 Блоки управления электродвигателем реверсивные. Руководство по эксплуатации КГЖТ.426436.007 РЭ, ЗАО «Волмаг». – Чебоксары. – 35 с.
- 61 ГОСТ 21.110-2013 Система проектной документации для строительства (СПДС). Спецификация оборудования, изделий и материалов. – М.: Издательство стандартов, 2013. – 8 с.
- 62 ГОСТ 21.403-80 СПДС. Обозначения условные графические в схемах. Оборудование энергетическое. – М.: Государственный строительный комитет СССР, 1980. – 10 с.
- 63 СО 34.35.101-2003. Методические указания по объему технологических измерений, сигнализации, автоматического регулирования на тепловых электростанциях. – М.: ЦПТИ ОРГРЭС, 2004. – 119 с.
- 64 ГОСТ 10704-91. Трубы стальные электросварные прямошовные. – М.: Стандартиформ, 1991. – 10 с.
- 65 Щит Rittal навесной с монтажной панелью. [Электронный ресурс], 2005. – 17 с. Режим доступа: <http://www.crumem.ru/catalog> свободный. – Загл. с экрана.
- 66 Трудовой кодекс Российской Федерации от 30.12.2001 № 197-ФЗ (ред. от 05.02.2018). – 137 с.
- 67 ГОСТ Р ССБТ 12.0.007-2009 Система управления охраной труда в организации. Общие требования по разработке, применению, оценке и совершенствованию. – М.: Стандартиформ, 2009. – 25 с.

- 68 СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03. Гигиенические требования к ПЭВМ и организации работы. – М.: Информационно-издательский центр Минздрава России, 2003. – 32 с.
- 69 ТОО Р-45-084-01. Типовая инструкция по охране труда при работе на персональном компьютере. – М.: Стандартинформ, 2001. – 28 с.
- 70 СанПиН 2.2.542-96. Гигиенические требования к видеодисплейным терминалам, персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы. – М.: Информационно-издательский центр Минздрава России, 1996. – 46 с.
- 71 СанПиН 2.2.4.548-96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений. – М.: Информационно-издательский центр Минздрава России, 1996. – 32 с.
- 72 СН 2.2.4/2.1.8.562-96. Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий на территории застройки. – М.: Издательство стандартов, 1996. – 19 с.
- 73 СП 52.13330.2016. Естественное и искусственное освещение. – М.: Издательство стандартов, 2016. – 17 с.
- 74 ГОСТ 12.1.006 – 84 ССБТ. Электромагнитные поля радиочастот. Общие требования безопасности. – М.: Стандартинформ, 1984. – 30 с.
- 75 ГОСТ Р 50948-2001. Средства отображения информации индивидуального пользования. Общие эргономические требования и требования безопасности. – М.: Стандартинформ, 2001. – 45 с.
- 76 ГОСТ 29322-2014. Напряжения стандартные. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2014. – 18 с.
- 77 ГОСТ 12.0.003-2015 ССБТ. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2015. – 32 с.
- 78 СанПиН 2.2.4.548 – 96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений. – М.: Информационно-издательский центр Минздрава России, 1996. – 13 с.
- 79 ГОСТ 12.1.005-88 ССБТ. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны. – М.: Стандартинформ, 1988. – 20 с.

80 ГОСТ 12.1.003-2014. Шум. Общие требования безопасности. – М.: Стандартинформ, 2014. – 28 с.

81 СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278–03. Гигиенические требования к естественному, искусственному и совмещённому освещению жилых и общественных зданий. – М.: Информационно-издательский центр Минздрава России, 2003. – 32 с.

82 ГОСТ Р 50948-2001. Средства отображения информации индивидуального пользования. Общие эргономические требования и требования безопасности. – М.: Стандартинформ, 2001. – 25 с.

83 СанПиН 2.2.4.548-96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений. – М.: Информационно-издательский центр Минздрава России, 1996. – 22 с.

84 СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03. Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы. – М.: Информационно-издательский центр Минздрава России, 2003. – 36 с.

85 Правила устройства электроустановок. Все действующие разделы шестого и седьмого изданий с изменениями и дополнениями по состоянию на 1 февраля 2014 г. – М.: КНОРУС, 2014. – 488 с.

86 ГОСТ 12.4.011-89 ССБТ. Средства защиты работающих. Общие требования и классификация. – М.: Стандартинформ, 1989. – 27 с.

87 Пальгунов П. П., Сумароков М. В.// Утилизация промышленных отходов. – М. Стройиздат, 1990. –352с.

88 О вторичной переработке. [Электронный ресурс]. – 7 с. Режим доступа: <http://www.eplastic.ru/specialistam/vtorichnaya-pererabotka>, свободный. – Загл. с экрана.

89 Порядок действий при возникновении пожара. [Электронный ресурс]. – 36 с. Режим доступа: <http://70.mchs.gov.ru/document/1477133>, свободный. – Загл. с экрана.

90 Основные причины пожаров и меры их предупреждения. [Электронный ресурс]. – 42 с. Режим – Режим доступа: [http://compcentr.ru/library/PTM/ptm\\_zd02.pdf](http://compcentr.ru/library/PTM/ptm_zd02.pdf), свободный. – Загл. с экрана.

## Приложение А

(обозначение)

Study on the influence of the method for installation of primary measuring transducers on the quality of ACS operation with a superheater of a power boiler

Студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5БМ74	Бойкова Тамара Сергеевна		

Консультант школы отделения (НОЦ) НОЦ И.Н. Бутакова:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент НОЦ И.Н. Бутакова ИШЭ	Иванова Е.В.	к.ф.-м.н.		

Консультант – лингвист отделения (НОЦ) школы: ОИЯ ШБИП

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОИЯ ШБИП	Черемисина Харрер И.А.	к.ф.н., доцент		

## Introduction

Today, almost all enterprises operate thanks to embedded automated control systems. Such systems are necessary for the production of large volumes of products, facilitating the labor of people and maintaining the reliability of the equipment. The most important are enterprises of the energy sector, since they are responsible for the life support of the housing and utilities sector, delivering heat and electricity to consumers. Thermal power plants, boiler rooms and other enterprises have particularly important parameters that require great attention, constant monitoring and regulation, one of them is temperature. Temperature measurement takes up to 50% of the total number of measurements, it is important for monitoring processes, analyzing both technical and economic indicators of production, as well as for determining the reliability and durability of equipment operation under various conditions. The effect of exceeding the calculated temperature on the reliability of the equipment [1] is due to a change in the metal structure, thinning of pipes, the development of microcracks, which leads to the appearance of local gusts and subsequently to equipment failures as a whole [2, 3]. An increase in the average temperature heat supply in a cycle leads to an increase in thermal efficiency, but since the effect of pressure on the thermal efficiency of a cycle is ambiguous, a further increase in parameters leads to a decrease in the efficiency of saturated steam. From [1, 4], it follows that when regulating the temperature at modern power plants, there are limiting requirements for the accuracy of maintaining a parameter at a given value and for ensuring the stable operation of automatic controllers [5].

Reliability requirements are determined by the thermophysical features of the metal of the heating surface of the boiler. When the metal is heated, the atomic mobility increases, the vibration amplitude increases, interatomic bonds are weakened, and the transition of atoms to new positions is facilitated. All this significantly affects the change in the physicochemical and mechanical properties of metals and alloys. When exposed to high temperatures up to 600 °C, the steel loses its bearing capacity, as a consequence of the onset of temperature plasticity. In this

case, when exposed to high temperatures with a decrease in wall thickness, there is a loss of strength and a transition from an elastic state to an elastic-plastic one. Steel creep is practically one of the most important manifestations of the influence of high temperatures on steel under prolonged external load [6, 7].

As mentioned above, not only the excess of the permissible value of the measured value, but also the duration of the equipment operation at elevated temperatures has a great impact on the service life of the equipment. Excessive steam temperature of the calculated values within a few hours leads to the loss of the resource of the heating surfaces of the boiler, equivalent to several months of operation with the standard parameters. The high-quality operation of the automatic control system ensures the reliability of the operation of the units, prevents metal deformation and gusts, and also contributes to an increase in the service life of the equipment metal.

When measuring the temperature of superheated steam at the stations, thermoelectric converters (TEC) are used. To protect the sensing element TEC and ease of installation of the sensor using protective sleeves. Since when a temperature sensor is installed in a sleeve, gaps are formed between them that affect the inertia of the temperature measuring channel, and, as a result, the control system as a whole [8], buffer materials that minimize the inertia index are used to fill the protective sleeve, thereby increasing the reaction rate of the system to temperature changes.

The aim of the work is to study the effect of the inertia of the “thermoelectric converter - protective sleeve” system on the quality of the operation of the superheated steam temperature control system and, as a result, on the reliability of operation of thermal power plant (TPP) units.

To do this, we should perform the following tasks:

- 1) to analyze the published scientific papers;
- 2) using parametric synthesis, the control system determines the transfer functions of the control object;
- 3) to perform a numerical assessment of the dynamic characteristics of TEP depending on the method of mounting the sensors;

4) to calculate the parameters of the controller settings and transients in the ACP temperature of superheated steam for different installation conditions of the sensors;

5) develop design and design documentation.

#### State of the art in research

The work of researchers of the Belarusian National Technical University (Kulakov G.T., Gorelysheva M.L.), the National Research University "MEI" (Goryainova V.V.), the Institute of Energy of the Academy of Sciences of Moldova (Zhuravlev AA, Shit ML.), Russian State University. A.N. Kosygina (Konkov D.I., Zakharkina S.V., Vlasenko O.M.), Volzhsky Polytechnic Institute (Trushnikov MA), the scientific center of the Moscow company ORGRES OJSC (V. Kholshchev), works by Kuznetsov S.S., Sebina L.P., Kolesnikova O.V., Prosoedova R.A., as well as many Chinese scientists.

The main issues addressed are the study of the effect of the relative time constant of the object, associated with the high inertia of the object, on the quality of temperature control of superheated steam [9–12]. Solutions are proposed in this group of scientists through the development of prognostic models. The strategy of planning a hybrid model, aimed at reducing the long regulation time and improving management characteristics, is considered. Temperature measurements are carried out in a system with a PI and PID controller in a real object and in the predicted model. Reducing the value of the relative time constant of the object when working on an external disturbance results in a decrease in the relative time of appearance of the maximum dynamic control error from the total relative regulation time and improves the performance of the control system. In [12], a new method was developed to compensate for the inertia of thermocouple signals and the inertia of the channel to the effect of steam consumption on steam temperature after the superheater (functional dependence of the steam temperature at the steam superheater output on steam consumption). The use of compensation methods: the



inertia of thermocouple signals in the superheater; the inertia of the signal flow of steam, allows you to reduce up to 2 times the duration of transients. Thus, the use of the developed models helps not only to predict the change of especially important parameters of regulation, but also to evaluate the effectiveness of applying the strategy for changing the time of regulation.

The following paper considers the effect of the temperature sensor installation on the quality of regulation. Thus, in the article [13], according to the developed models, the duration of heating of sensitive elements necessary to achieve the temperature of the thermocouple within the limits of the permissible deviation from the rated current of the characteristics for three types of thermocouples - K, L and S.

A group of articles [14–19] describes ways to control the temperature of superheated steam, by changing the fuel supply, using different power unit operation modes, as well as using fuzzy logic of controllers and changing system operation parameters in a mathematical model of steam cooling of a boiler. An adjustment of the fuel-to-water ratio is considered, as well as effective methods of vapor cooling (regulation of the temperature of superheated steam) [19]. For example, in [14] the method of controlling the amount of coal and the method of controlling the amount of feed water are combined using fuzzy control. The simulation results show that an improved control method has a better control effect, and a higher boiler efficiency has been obtained. In [18], the control algorithm is based on the cascade control method with temperature error correction based on the rate of change in steam temperature after condensate injection. A mathematical model of boiler steam cooling is described. The simulation results show that the method of controlling the temperature of the superheated steam of the boiler has good quality characteristics, which implies effective control and reducing the likelihood of accidents.

In [20–21] to control the temperature of superheated steam, the choice of control valves is justified and the principles of optimal control are presented, and a complex mathematical model of the dynamics of a drum steam boiler is developed using an automatic control system. The model is supplemented with basic control

loops with typical control algorithms. The main interrelations between the control loops are determined and the dynamics of their interaction is investigated. The results of modeling the basic technological parameters in the form of transients are given. The article [22] discusses effectively the permissible temperature deviations from nominal, contributing to the minimum loss of the heating surfaces of the boiler and the extension of its service life. The change in the service life of the metal is also considered in [23] through the influence of the quality of regulation. The dependence of the service life of the metal on the size of the dispersion for different steel grades, as well as the numerical values of the increase in the service life of the superheater metal during the transition from manual control to typical automatic control system (ACS) and from standard to advanced ACS, are determined. Changing the metal working conditions by improving the quality of regulation leads to a significant increase in time, which remains until the service life of the superheater heating surface is exhausted.

In [24], special attention is paid to maintaining the superheated steam temperature within the specified limits, regardless of the load of the boiler unit. Since the metal pipes of the boiler unit are in particularly difficult working conditions. An increase in temperature above permissible values may lead to an accident due to the appearance of metal creep, increased thermal expansion and a number of other reasons. To achieve the goals in the work, the tasks of introducing a correction for the temperature before the second injection are solved, auto-tuning of the controller coefficients depending on the boiler load.

An analysis of the published works shows that, despite the fact that many works have suggested ways to solve the problem of controlling the temperature of superheated steam, as well as maintaining it at a given level, there are currently no works that consider the quality of temperature control of steam taking into account the dynamic characteristics of measuring temperature converters. The determination of the acceleration curves of temperature sensors is usually performed simultaneously with the determination of the dynamic characteristics of the control object [25], however, when replacing the sensor, its characteristics may change,

which is not taken into account when adjusting the regulators. Therefore, to assess the changed dynamic characteristics [26], it is advisable to use the prognostic modeling tool.

#### The method of parametric synthesis of the regulatory system

The research of the quality of operation for the ACS of the superheater was performed for a steam generator with the following characteristics: steam consumption 1400 t/h, superheated steam temperature 565 °C, superheated steam pressure behind the steam valve 25, 1 MPa.

The calculation was carried out for a control system with a signal characterizing the rate of change in steam temperature at an intermediate point. The system under consideration has an effect on steam temperature with the help of injection coolers.

A block diagram of the ASR temperature of superheated steam is shown in Figure 1.

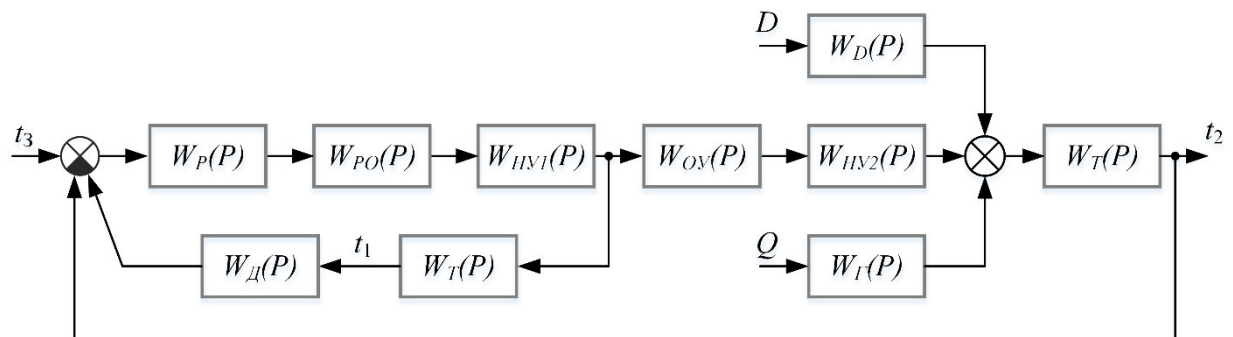


Figure 1 - Block diagram of the ASR temperature of superheated steam

Table 1 - List of accepted designations of Figure 1

Designation	Description	Function
$W_p(P)$	Regulator transfer function	$W_p(P) = k_p \left( 1 + \frac{1}{T_H \cdot P} \right)$
$W_{PO}(P)$	Regulatory transfer function	$W_{PO}(P) = K_{PO}$
$W_{HV1}(P)$	The transfer function of the first unheated area	$W_{HV1}(P) = \frac{T_2^{HV1} \cdot P + 1}{T_1^{HV1} \cdot P + 1}$

Table continuation 1

Designation	Description	Function
$W_{Oy}(P)$	The transfer function of the heated area	$W_{Oy}(P) = \frac{K_{Oy}}{T_{Oy} \cdot P + 1} \cdot e^{-P \cdot \tau}$
$W_{HY2}(P)$	The transfer function of subsequent unheated areas	$W_{HY1}(P) = \frac{T_2^{HY2} \cdot P + 1}{T_1^{HY2} \cdot P + 1}$
$W_T(P)$	Transfer function of thermoelectric converter	$W_T(P) = \frac{K_T}{T_H \cdot P + 1}$
$W_{\Delta}(P)$	Differentiator transfer function	$W_{\Delta}(P) = \frac{k_{\Delta} \cdot T_{\Delta} \cdot P}{T_{\Delta} \cdot P + 1}$
$W_D(P)$	The transfer function of the perturbation channel steam flow	—
$W_I(P)$	Transfer function in the perturbation channel of the gas temperature	—
$t1 \text{ } u \text{ } t2$	Signals at the output of thermoelectric converters	—
$t3$	Task signal	—
$D$	Perturbation of steam consumption change	—
$Q$	Indignation of a change in thermal perception	—

As an automated control of the superheated steam temperature, various control schemes are used. Consider the one-pulse and two-pulse circuits.

The input of the regulator receives a signal proportional to the deviation of the temperature of the superheated steam from the specified value. Depending on the sign and magnitude of the temperature deviation, the regulating device acts through the actuator on the regulator, thereby restoring the set value of the superheated steam temperature. Such regulation is single impulse. However, this scheme is rarely used due to low quality regulation.

The main disadvantage of such ACS is disturbing influences that enter the control object in the form of a change in steam temperature at the superheater outlet. Taking into account the inertia of the considered area, the deviation of the output value in transient conditions may significantly exceed the norm.

To improve the quality of the transition process when regulating the temperature of steam, a two-pulse automatic control system is used. Almost all disturbances from the pre-connected packages of the superheater to the regulated section can be filtered using an internal low-inertia circuit, while using an external inertial circuit, the temperature is maintained at a predetermined value. Such a system can ensure the maintenance of a controlled variable at the entrance to the section of the superheater, and hence a higher quality control parameter at the outlet of the superheater.

The superheated steam temperature in the boiler superheater is controlled by injecting its own condensate into the superheater. First, the injection is carried out behind the medium screens, then - behind the extreme screens of the superheater. For injection, condensate is used, which is obtained in shell-and-tube condensation units installed to the right and left of the drum. Cooling of the saturated steam going to the condensers from the drum is carried out with feed water, which has passed the first stage of the water economizer.

ACS temperature superheated steam drum boiler must meet the technical requirements, namely:

- to ensure the stable operation of automatic regulators (therefore, there should be no auto-oscillations), the minimum number of their inclusions (no more than six inclusions per minute);
- maintain the set temperature of the superheated steam  $t_{ss} = 565^{\circ} \text{C}$  at the exit from the boiler at rated load with a deviation of less than 1% from the nominal value of temperature;
- at a step load change of 10% from the initial nominal, the maximum deviation  $t_{ss} \leq \pm 8^{\circ} \text{C}$ .

These requirements operate in a stationary mode of operation of the ACS, since in cases of transitional conditions the parameters have a large deviation, it is necessary to take measures to minimize them.

The controller settings are directly dependent on the static and dynamic characteristics of the object, as well as on the characteristics of the thermoelectric

converter. Basically, the selection of a regulator consists of three stages: a preliminary selection, a calculation of the setting, and a stability check. At the stage of calculating the settings, the exact value of the time constant ( $T_i$ ) of the sensor cannot be determined; therefore, an average value is used (as a rule, 15–20 seconds). Often this value may differ from the one adopted due to the use of protective sleeves, buffer materials for their filling and different operating conditions. Since a significant difference in the accepted and real values of the parameter  $T_i$  may affect the controller settings, there is an interest in studying the effect of the temperature and energy efficiency on the general controller settings and the quality of transients in the regulated system.

## References

- 1 Atroshenko Y.K., Bychkova A.A., Andyk V.S. About influence of operational temperatures on reliability of operation of the equipment of thermal power plants. *Matec Web of Conferences*. – Vol. 72, 2016. – Article number 01006.
- 2 Alekhnovich A.N. High-temperature corrosion involving sulfur compounds with stepwise burning of coal. *Energetic*. – Vol 11, 2011. – P. 34–36.
- 3 Kamenetsky B.Ya. High temperature corrosion of flue screens. *Heavy machinery*. – Vol 11-12, 2012. – P. 38–40.
- 4 Izotova D.E. The effect of high temperatures on the strength of building materials. *Digest of articles. Samara State Technical University*. - Samara, 2017. – P.3.
- 5 Corrosion and wear of heating surfaces of boilers: textbook / Oats A.A. - M., 1987. – 272 P.
- 6 Kulakov G.T., Gorelysheva M.L. The study of the influence of the quality of temperature regulation of superheated steam on the service life of the metal of the boiler superheater. *Energy. Proceedings of higher educational institutions and energy associations*. – Vol 4, 2009. – P. 62–69.
- 7 Thermal and nuclear power plants: Studies for universities / L.S. Sterman, S.A. Tevlin, A.T. Sharkov; Ed. L.S. Sterman, 1982. – 456 P.
- 8 Automatic control of heat and power facilities: study guide / G. A. Lipatnikov, M. S. Guzeev; Far Eastern State Technical University (FEPI named after V.V. Kuibyshev). - Vladivostok: Publishing House FESTU, 2007. – P. 225.
- 9 Xu, H., Li, S., Zhang, L., Liu, H. Two-degree-of-freedom PID boiler steam temperature control method based on the internal model principle / *Chinese Control Conference*, Vol 8483022, 2018. – P. 3420–3424.
- 10 Chen, W., Cen, L., Cao, A. Multiple-Model Internal Model Control of Main Steam Temperature with a Hybrid Model Scheduling Strategy / *Chinese Control Conference*, Vol 8483456, 2018. – P. 440-445.

- 11 Yang, X.-Y., Xu, D.-P., Liu, Y.-B., Han, X.-J. Study on strategy of superheated steam temperature control using multi-model predictive functions / Dongli Gongcheng / Power Engineering, Vol 25, 2005. – P. 537-540.
- 12 Yang, Z., Zhang, Y., Gao, W. Improved Model of an Intermediate Point Enthalpy Control System for Enhancing Boiler Efficiency / Journal of Energy Resources Technology, Transactions of the ASME, Vol 141(2), 2019.
- 13 Kuznetsov, S.S., Sebina, L.P., Ryzhkova, E.A. Regulating steam temperature in drum boilers by means of injection desuperheaters. initial investigation of the controlled object / Fibre Chemistry, Vol 45 (2), 2013. – P. 114 - 118.
- 14 Vijayalakshmi, V. Design of superheated steam temperature control using fuzzy logic controller / Engineering and Management, 2018. – P. 1076 - 1084.
- 15 Goryainova V.V. Optimization of the automatic temperature control system for superheated steam of a direct-flow boiler / Radioelectronics, electrical engineering and power engineering, 2017. – P. 198.
- 16 Kolesnikova, O.V., Tsypkaikina, A.D., Prosoedov, R.A. Method of automation control of boiler steam temperature / International Russian Automation Conference, Vol. 8501836, 2018.
- 17 Regulation of the temperature of superheated steam / V. Kholshchev // Thermal Power Engineering, Vol 8, 2003. – P. 39 – 43.
- 18 Investigation of the influence of the quality of temperature regulation of superheated steam on the service life of the metal of the boiler superheater / Kulakov GT, Gorelysheva ML L. Energetika. Proceedings of higher educational institutions and energy associations, Vol. 4, 2009. – P. 62 – 69.
- 19 Stepanets, A. V. Audit of quality of operation of control algorithms for drum-type steam boilers at the design stage of an automation system / A. V. Stepanets, L. A. Koropova // Technological audit and production reserves, 2015. – Vol. 3(2). – P. 8 – 12.



20 Trushnikov MA / Study of systems for the automatic control of the temperature of superheated steam in a drum boiler // Volzhsky Polytechnic Institute. – P 5.

21 Stryzhnev A.G. Identification of the control object by the transition characteristic of a closed system / A.G. Strizhnev, A.V. Markov, A.N. Rusakovich. - 2012.- Vol. 5 (67). - P. 65-72.

22 System of automatic temperature control of a superheated steam drum boiler / Zhuravlev AA, Shit M.L., Poponova OB, Shit B.M., Zubaty A.L. // Problems of regional energy, Vol. 1, 2006. – P.25–39.

23 Kuznetsov S.S., Ryzhkina E.A. Quality of automatic control of steam temperature at the boiler TP-87 / Design, Technologies and innovations in the textile and light industry, 2014. – P. 130-132.

24 Konkov DI, Zakharkina S.V., Vlasenko OM. / System of effective automatic control of steam temperature at the outlet of the boiler // PNRTU Bulletin. Electrical engineering, information technology, control systems, Vol. 23, 2017. – P. 159 – 166.

25 Kulakov G.T., Gorelysheva M.L. The study of the influence of the quality of temperature regulation of superheated steam on the service life of the metal of the boiler superheater. Energy. Proceedings of higher educational institutions and energy associations. – Vol. 4, 2009. – P. 62–69.

26 Chen, W., Cen, L., Cao, A. Multiple-Model Internal Model Control of Main Steam Temperature with a Hybrid Model Scheduling Strategy. Chinese Control Conference. – Article number 8483456, 2018. – P. 440–445.

## Приложение Б

### Расчет статических и динамических характеристик системы

В данной работе для измерения температуры будем использовать измерительный преобразователь в комплекте с ТЭП, коэффициент передачи  $K_T$  которого определяется при лабораторной поверке прибора.

В таблице А.1 приведены результаты экспериментального определения статической характеристики ТЭП (ХКн).

Таблица А.1 – ТермоЭДС термопары типа ХКн

Температура, °C	0	100	200	300	400	500	560
ТермоЭДС, мВ	0	6,319	13,421	21,036	28,946	37,005	41,799

По таблице 1 строим зависимость тока от температуры (рис. 1).

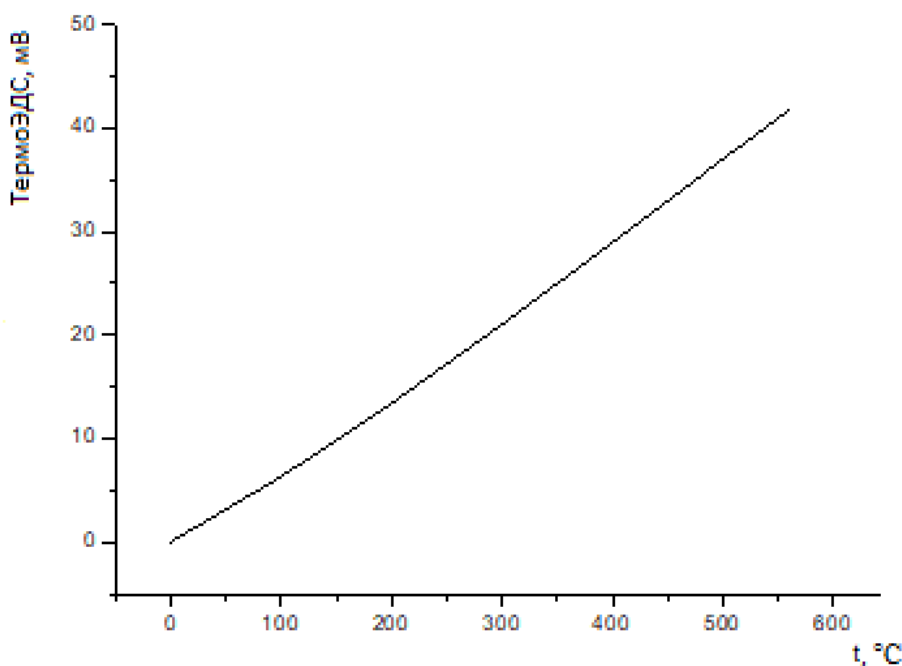


Рисунок 1 – Статическая характеристика измерительного преобразователя

По графику определим коэффициент передачи измерительного преобразователя:

$$K_T = \frac{\Delta E}{\Delta t} = \frac{(41,799 - 21,036)}{(560 - 300)} = 0,079 \frac{мВ}{°C};$$

Передаточная функция измерительного преобразователя в комплекте с ТЭП:

$$W_T(p) = \frac{K_T}{(T_H p + 1)},$$

где  $T_H$  – постоянная времени измерительного преобразователя,  $T_H = 15-20$  с.

Передаточная функция измерительного преобразователя:

$$W_T(p) = \frac{0,079}{20 \cdot p + 1}.$$

Расчет передаточной характеристики клапана впрыска

Расходная характеристика шиберного клапана впрыска по заданию представлена в таблице 2.

Таблица 2 – расходная характеристика шиберного клапана впрыска

$G/G_{\max}$	0,13	0,25	0,36	0,47	0,56	0,64	0,69	0,74	0,78	0,8
УП, %	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100

График расходной характеристики представлен на рисунке 2.

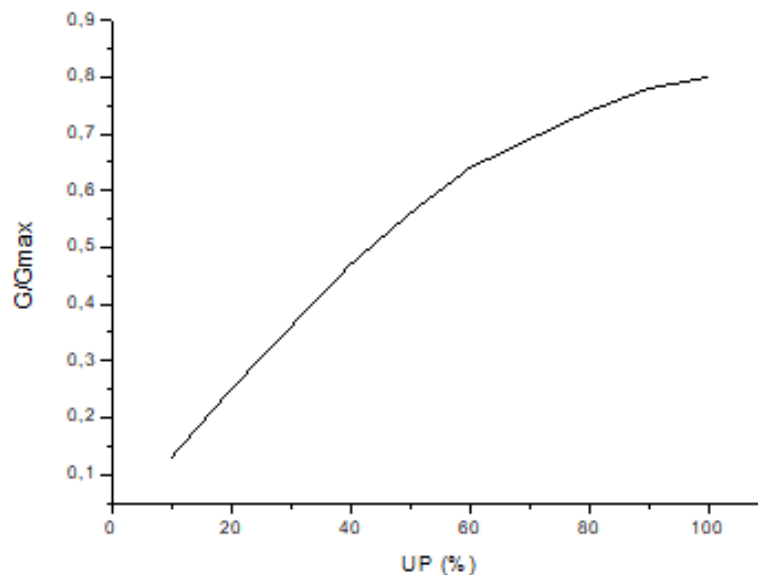


Рисунок 2 – График расходной характеристики шиберного клапана впрыска

Из графика определяем:  $t_{g1} = \frac{45 \cdot 6}{40} = 6,75$ ,  $t_{g1} = \frac{55 \cdot 7,5}{50} = 8,25$ .

Коэффициент передачи:  $k_{PO} = \frac{8,25 - 6,75}{60,17 - 51,22} = 0,1676$ .

Передаточная функция регулирующего клапана:  $W(P)_{PO} = 0,1676$ .

Рассчитываем коэффициент передачи пароохладителя. Находим значение температуры перегретого пара  $t_{пп,1}$  на выходе пароохладителя при минимальном расходе питательной воды на впрыск. Для этого воспользуемся уравнением теплового баланса:

$$D_{пп} \cdot i_{пп} + W_{по,мин} \cdot i_{в} = (D_{пп} + W_{по,мин}) \cdot i_{пп,1},$$

где  $D_{пп}$  – расход перегретого пара из котла, т/ч;

$W_{по,мин}$  – минимальный расход воды на впрыск, т/ч;

$i_{пп}$  – энтальпия перегретого пара на входе в пароохладитель,  $i_{пп} = 3253,4$  кДж/кг;

$i_{в}$  – энтальпия охлаждающей воды,  $i_{впр} = 1288$  кДж/кг;

$i_{пп,1}$  – энтальпия перегретого пара на выходе из пароохладителя, кДж/кг.

Из уравнения теплового баланса считаем энтальпию перегретого пара:

$$i_{пп,1} = \frac{D_{пп} \cdot i_{пп} + W_{по,мин} \cdot i_{в}}{D_{пп} + W_{по,мин}} = \frac{1400 \cdot 3253,4 + 20 \cdot 1288}{1400 + 20} = 3257,86 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

По величине энтальпии перегретого пара  $i_{пп,1}$  в таблице теплофизических свойств воды и водяного пара находим температуру на выходе из пароохладителя:  $t_{пп,1} = 525,97$  °С.

Вычисляем энтальпию перегретого пара на выходе из пароохладителя при максимальном расходе охлаждающей воды на впрыск:

$$i_{пп,2} = \frac{D_{пп} \cdot i_{пп} + W_{по,макс} \cdot i_{в}}{D_{пп} + W_{по,макс}} = \frac{1400 \cdot 3253,4 + 70 \cdot 1288}{1400 + 70} = 3190,86 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}},$$

где  $W_{по,макс}$  – максимальный расход воды на впрыск, т/ч.

По величине энтальпии перегретого пара  $i_{пп,2}$  в таблице теплофизических свойств воды и водяного пара [5] находим температуру на выходе из пароохладителя:  $t_{пп,2} = 507,12$  °С.

Производим расчет коэффициента передачи пароохладителя:

$$K_{по} = \frac{t_{пп,2} - t_{пп,1}}{W_{по,макс} - W_{по,мин}} = \frac{507,12 - 525,97}{52,5 - 20} = -0,58.$$

Знак коэффициента передачи парохладителя оказался отрицательным. При введении в АСУ отрицательной обратной связи он будет меняться на противоположный.

Рассчитываем коэффициент передачи регулирующего органа:

$$K_{po} = K_{pнк} \cdot K_{no} = 0,82 \cdot 0,58 = 0,47.$$

### Расчет параметров первого необогреваемого участка

Участок трубопровода от места впрыска до места установки термодпары выделяем в первый необогреваемый (опережающий) участок и подсчитываем для него значения характерных параметров.

Условный коэффициент теплоотдачи на внутренней поверхности змеевиков:

$$\alpha_{2_1}^* = \frac{\alpha_{2_1}}{1 + \left( \frac{0,2 \cdot d_{en1} \cdot \alpha_{2_1}}{\lambda_{m1}} \right) \cdot \ln \left( \frac{d_{n1}}{d_{en1}} \right)} = 5,969 \cdot 10^3.$$

Внутренняя поверхность змеевиков пакета, омываемая паром:

$$F_{en1} = d_{en1} \cdot n_1 \cdot \pi \cdot l_1 = 50,894 \text{ м}^2.$$

$$\text{Коэффициент усиления: } k_1 = \frac{\alpha_{2_1}^* \cdot F_{en1}}{D \cdot C_{p1}} = 0,062.$$

$$\text{Масса змеевиков пакета: } G_{m1} = g_{m1} \cdot l_1 \cdot n_1 = 24,48 \cdot 10^3 \text{ кг.}$$

$$\text{Постоянная времени Т: } T = 3600 \frac{G_{m1} \cdot C_{p1}}{\alpha_{2_1}^* \cdot F_{en1}} = 154,61 \text{ с.}$$

Постоянные времени:

$$T_1 = \left( 1 + \frac{k_1}{2} \right) \cdot T = 159,4 \text{ с}, \quad T_2 = \left( 1 - \frac{k_1}{2} \right) \cdot T = 149,8 \text{ с.}$$

Энтальпия пара  $i_1 = 3273,77 \text{ кДж/кг}$ , энтальпия впрыска  $i_{enp} = 1181,61 \text{ кДж/кг}$ .

$$\text{Коэффициент впрыска: } k_{enp} = \frac{(i_1 - i_{enp})}{D \cdot C_{p1}} = 0,427.$$

Передаточная функция первого необогреваемого участка:

$$W_{i1}(p) = k_{впр} \cdot \frac{T_2 + 1}{T_1 + 1} = 0,427 \cdot \frac{149,8 \cdot p + 1}{159,4 \cdot p + 1}.$$

Искомая передаточная функция 1-го опережающего участка с учетом динамической характеристики термопары и регулирующего органа имеет

$$\text{вид: } W_{об,1}(p) = K_{po} \cdot \frac{T_2 \cdot p + 1}{T_1 \cdot p + 1} \cdot \frac{K_T}{T_T \cdot p + 1},$$

где  $K_{po}$  – коэффициент передачи регулирующего органа;  $K_T$  – передаточный коэффициент измерительного преобразователя, мА/ °С.

$$W_{об,1}(p) = 0,47 \cdot \frac{149,8 \cdot p + 1}{159,4 \cdot p + 1} \cdot \frac{0,079}{20 \cdot p + 1}.$$

### Расчет параметров второго необогреваемого участка

Условный коэффициент теплоотдачи на внутренней поверхности змеевиков:

$$\alpha_{2_2}^* = \frac{\alpha_{2_2}}{1 + \left( \frac{0,2 \cdot d_{вн2} \cdot \alpha_{2_2}}{\lambda_{м2}} \right) \cdot \ln \left( \frac{d_{н2}}{d_{вн2}} \right)} = 4,98 \cdot 10^3.$$

Внутренняя поверхность змеевиков пакета, омываемая паром:

$$F_{вн2} = d_{вн2} \cdot n_2 \cdot \pi \cdot l_2 = 64,4 \text{ м}^2.$$

$$\text{Коэффициент усиления: } k_2 = \frac{\alpha_{2_2}^* \cdot F_{вн2}}{D \cdot C_{p2}} = 0,0676.$$

$$\text{Масса змеевиков пакета: } G_{м2} = g_{м2} \cdot l_2 \cdot n_2 = 39,3 \cdot 10^3 \text{ кг.}$$

$$\text{Постоянная времени Т: } T_2 = 3600 \frac{G_{м2} \cdot C_{p2}}{\alpha_{2_2}^* \cdot F_{вн2}} = 235,07 \text{ с.}$$

### Расчет параметров третьего необогреваемого участка

Условный коэффициент теплоотдачи на внутренней поверхности змеевиков:

$$\alpha_{23}^* = \frac{\alpha_{23}}{1 + \left( \frac{0,2 \cdot d_{вн3} \cdot \alpha_{23}}{\lambda_{м3}} \right) \cdot \ln \left( \frac{d_{н3}}{d_{вн3}} \right)} = 6,76 \cdot 10^3.$$

Внутренняя поверхность змеевиков пакета, омываемая паром:

$$F_{вн3} = d_{вн3} \cdot n_3 \cdot \pi \cdot l_3 = 20,11 \text{ м}^2.$$

$$\text{Коэффициент усиления: } k_3 = \frac{\alpha_{23}^* \cdot F_{вн3}}{D \cdot C_{p3}} = 0,0286.$$

$$\text{Масса змеевиков пакета: } G_{м3} = g_{м3} \cdot l_3 \cdot n_3 = 8,02 \cdot 10^3 \text{ кг.}$$

$$\text{Постоянная времени Т: } T_3 = 3600 \frac{G_{м3} \cdot C_{p3}}{\alpha_{23}^* \cdot F_{вн3}} = 113,12 \text{ с.}$$

### Расчет параметров четвертого необогреваемого участка

Условный коэффициент теплоотдачи на внутренней поверхности змеевиков:

$$\alpha_{24}^* = \frac{\alpha_{24}}{1 + \left( \frac{0,2 \cdot d_{вн4} \cdot \alpha_{24}}{\lambda_{м4}} \right) \cdot \ln \left( \frac{d_{н4}}{d_{вн4}} \right)} = 6,53 \cdot 10^3.$$

Внутренняя поверхность змеевиков пакета, омываемая паром:

$$F_{вн4} = d_{вн4} \cdot n_4 \cdot \pi \cdot l_4 = 20,11 \text{ м}^2.$$

$$\text{Коэффициент усиления: } k_4 = \frac{\alpha_{24}^* \cdot F_{вн4}}{D \cdot C_{p4}} = 0,0299.$$

$$\text{Масса змеевиков пакета: } G_{м4} = g_{м4} \cdot l_4 \cdot n_4 = 8,02 \cdot 10^3 \text{ кг.}$$

$$\text{Постоянная времени Т: } T_4 = 3600 \frac{G_{м4} \cdot C_{p4}}{\alpha_{24}^* \cdot F_{вн4}} = 124,16 \text{ с.}$$

### Расчет параметров пятого необогреваемого участка

Условный коэффициент теплоотдачи на внутренней поверхности змеевиков:

$$\alpha_{25}^* = \frac{\alpha_{25}}{1 + \left( \frac{0,2 \cdot d_{вн5} \cdot \alpha_{25}}{\lambda_{м5}} \right) \cdot \ln \left( \frac{d_{н5}}{d_{вн5}} \right)} = 9,262 \cdot 10^3.$$

Внутренняя поверхность змеевиков пакета, омываемая паром:

$$F_{вн5} = d_{вн5} \cdot n_5 \cdot \pi \cdot l_5 = 74,3 \text{ м}^2.$$

$$\text{Коэффициент усиления: } k_5 = \frac{\alpha_{25}^* \cdot F_{вн5}}{D \cdot C_{p5}} = 0,157.$$

$$\text{Масса змеевиков пакета: } G_{м5} = g_{м5} \cdot l_5 \cdot n_5 = 24,65 \cdot 10^3 \text{ кг.}$$

$$\text{Постоянная времени Т: } T_5 = 3600 \frac{G_{м5} \cdot C_{p5}}{\alpha_{25}^* \cdot F_{вн5}} = 73,39 \text{ с.}$$

### Расчет параметров шестого необогреваемого участка

Условный коэффициент теплоотдачи на внутренней поверхности змеевиков:

$$\alpha_{26}^* = \frac{\alpha_{26}}{1 + \left( \frac{0,2 \cdot d_{вн6} \cdot \alpha_{26}}{\lambda_{м6}} \right) \cdot \ln \left( \frac{d_{н6}}{d_{вн6}} \right)} = 4,75 \cdot 10^3.$$

Внутренняя поверхность змеевиков пакета, омываемая паром:

$$F_{вн6} = d_{вн6} \cdot n_6 \cdot \pi \cdot l_6 = 36,06 \text{ м}^2.$$

$$\text{Коэффициент усиления: } k_6 = \frac{\alpha_{26}^* \cdot F_{вн6}}{D \cdot C_{p6}} = 0,039.$$

$$\text{Масса змеевиков пакета: } G_{м6} = g_{м6} \cdot l_6 \cdot n_6 = 22,008 \cdot 10^3 \text{ кг.}$$

$$\text{Постоянная времени Т: } T_6 = 3600 \frac{G_{м6} \cdot C_{p6}}{\alpha_{26}^* \cdot F_{вн6}} = 262,74 \text{ с.}$$



## Расчет параметров седьмого необогреваемого участка

Условный коэффициент теплоотдачи на внутренней поверхности змеевиков:

$$\alpha_{27}^* = \frac{\alpha_{27}}{1 + \left( \frac{0,2 \cdot d_{вн7} \cdot \alpha_{27}}{\lambda_{м7}} \right) \cdot \ln \left( \frac{d_{н7}}{d_{вн7}} \right)} = 5,71 \cdot 10^3.$$

Внутренняя поверхность змеевиков пакета, омываемая паром:

$$F_{вн7} = d_{вн7} \cdot n_7 \cdot \pi \cdot l_7 = 21,49 \text{ м}^2.$$

$$\text{Коэффициент усиления: } k_7 = \frac{\alpha_{27}^* \cdot F_{вн7}}{D \cdot C_{p7}} = 0,028.$$

$$\text{Масса змеевиков пакета: } G_{м7} = g_{м7} \cdot l_7 \cdot n_7 = 10,3 \cdot 10^3 \text{ кг.}$$

$$\text{Постоянная времени Т: } T_7 = 3600 \frac{G_{м7} \cdot C_{p7}}{\alpha_{27}^* \cdot F_{вн7}} = 172,49 \text{ с.}$$

Расчет обобщенных параметров для 2 – 7 необогреваемых участков

Характерные параметры:

$$k_{\text{эп}} = k_2 + k_3 + k_4 + k_5 + k_6 + k_7 = 0,35025;$$

$$T_{\text{эп}} = \frac{k_2 \cdot T_2 + k_3 \cdot T_3 + k_4 \cdot T_4 + k_5 \cdot T_5 + k_6 \cdot T_6 + k_7 \cdot T_7}{k_2 + k_3 + k_4 + k_5 + k_6 + k_7} = 141,2.$$

Обобщенные параметры для группы участков:

$$T_{\text{эп1}} = \left( 1 + \frac{k_{\text{эн}}}{2} \right) \cdot T_{\text{эп}} = 165,93; \quad T_{\text{эп2}} = \left( 1 - \frac{k_{\text{эн}}}{2} \right) \cdot T_{\text{эп}} = 116,47.$$

Передаточная функция необогреваемых участков:

$$W_{t234567}(p) = \frac{116,47 \cdot p + 1}{165,93 \cdot p + 1}.$$

## Расчет обогреваемого участка

Условный коэффициент теплоотдачи на внутренней поверхности змеевиков:

$$\alpha_{2и}^* = \frac{\alpha_{2и}}{1 + \left( \frac{0,2 \cdot d_{внш} \cdot \alpha_{2и}}{\lambda_{ми}} \right) \cdot \ln \left( \frac{d_{нш}}{d_{внш}} \right)} = 16,31 \cdot 10^3.$$

Внутренняя поверхность змеевиков пакета, омываемая паром:

$$F_{внш} = d_{внш} \cdot n_{и} \cdot \pi \cdot l_{и} = 16,02 \text{ м}^2.$$

$$\text{Коэффициент усиления: } k_{и} = \frac{\alpha_{2и}^* \cdot F_{внш}}{D \cdot C_{рш}} = 0,05573.$$

$$\text{Масса змеевиков пакета: } G_{ми} = g_{ми} \cdot l_{и} \cdot n_{и} = 1,35 \cdot 10^3 \text{ кг.}$$

$$\text{Постоянная времени Т: } T_{и} = 3600 \frac{G_{ми} \cdot C_{рш}}{\alpha_{2и}^* \cdot F_{внш}} = 9,91 \text{ с.}$$

По рассчитанному значению параметра  $K = 0,05573$  находим по номограмме ближайшее значение  $K = 2$  безразмерной кривой из семейства характеристик. Используя номограмму, заполняем второй столбец таблицы А.3 по значениям ординат  $\varphi_t(t)$  безразмерной кривой. В третий столбец вносим значения действительного времени, рассчитанные по формуле:

$$t = t_0 + \beta \cdot T, \text{ где } \beta - \text{безразмерное время};$$

$$T = 9,91 \text{ с} - \text{характерный параметр участка};$$

$$t_0 = L / \omega_{ср} = 15 / 14 = 1,071 \text{ с};$$

$$L = 15 \text{ м} - \text{длина паропровода участка 4};$$

$$\omega_{ср} = 14 \text{ м/с} - \text{средняя скорость пара.}$$

Таблица 3 – Исходные данные для построения переходного процесса

$\varphi_t(t)$	$\beta$	$t = t_0 + \beta \cdot T$
0	0	1,071
0,1	0	1,071
0,2	0,2	3,053
0,3	0,5	6,026
0,4	1	10,981

Продолжение таблицы 3

$\varphi_i(t)$	$\beta$	$t = t_0 + \beta \cdot T$
0,5	1,8	18,909
0,6	2	20,891
0,7	3	30,801
0,8	3,8	38,729
0,9	4,5	45,666
0,95	6	60,531
1	8,6	86,297

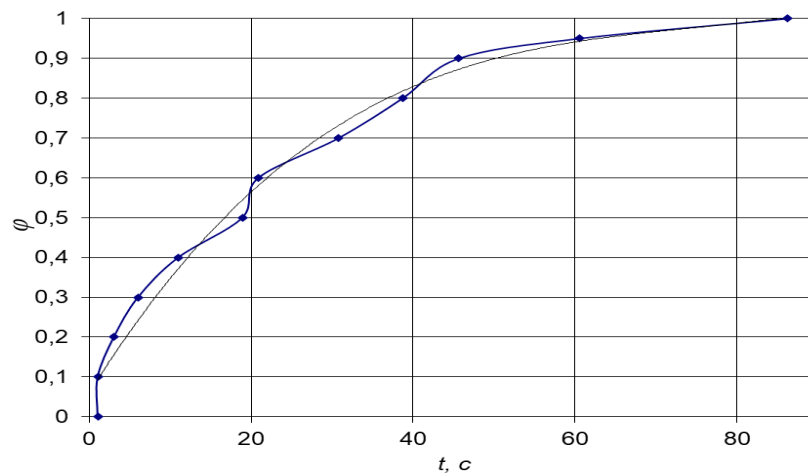


Рисунок 3 – График переходной характеристики обогреваемого участка пароперегревателя  $\varphi_i(t)$

Аппроксимируем полученную кривую. Определяем значения  $t$ , при которых  $\varphi_i(t_1) = 0,3$  и  $\varphi_i(t_2) = 0,7$ . Получаем:  $t_1 = 6,02$ ;  $t_2 = 30,81$ .

Чистое запаздывание  $\tau = 0,5 \cdot (3 \cdot t_1 - t_2) = 6,36$  с.

Постоянная времени  $T = 1,25(t_2 - t_1) = 30,97$  с.

Получили передаточную функцию обогреваемого участка:

$$W_{nu} = \frac{1}{30,97 \cdot p + 1} \cdot e^{-6,36 \cdot p}.$$

Производим расчет значения передаточного коэффициента по температуре пара  $K_t$  в зависимости от типа обогреваемой поверхности. Т.к.

ширма – поверхность с радиационным теплообменом:  $K_t = \frac{C_{p,ax}}{C_{p,вых}} = \frac{3,35}{3,24} = 1,034$ .

Передаточная функция объекта регулирования представляет собой произведение коэффициента передачи регулирующего органа, коэффициента передачи по температуре и передаточных функций первого опережающего участка, обогреваемого участка, группы необогреваемых участков, термопары:

$$W_{об}(p) = K_{po} \cdot K_t \cdot W_{m,1}(p) \cdot W_t(p) \cdot W_{m,2,3,5,6,7}(p) \cdot W_i(p),$$

$$W_{об}(p) = K_{po} \cdot K_t \cdot \frac{T_2 p + 1}{T_1 p + 1} \cdot \frac{K \cdot e^{-\tau_3 \cdot p}}{T p + 1} \cdot \frac{T_{2гр} p + 1}{T_{1гр} p + 1} \cdot \frac{K_T}{T_T p + 1},$$

$$W_{об}(p) = 0,47 \cdot 1,034 \cdot \frac{149,8 \cdot p + 1}{159,4 \cdot p + 1} \cdot \frac{1 \cdot e^{-6,36 \cdot p}}{30,97 p + 1} \cdot \frac{116,47 \cdot p + 1}{165,93 \cdot p + 1} \cdot \frac{0,0083}{20 p + 1}.$$

Передаточные функции регулятора и дифференциатора:

$$W_p(p) = k_p \cdot \left( 1 + \frac{1}{T_n \cdot p} \right) = C_1 + \frac{C_0}{p}, \quad W_d(p) = \frac{k_d \cdot T_d \cdot p}{T_d \cdot p + 1} = \frac{1}{C_3 + \frac{C_2}{p}},$$

$$\text{где } C_0 = \frac{k_p}{T_n}; \quad C_1 = k_p; \quad C_2 = \frac{1}{k_d \cdot T_d}; \quad C_3 = \frac{1}{k_d}.$$

Передаточная функция замкнутой АСР по задающему воздействию  $x$  относительно выходного параметра  $y$  согласно структурной схеме имеет вид:

$$W_{xc}^{x,y}(p) = \frac{W_p(p) \cdot W_{об2}(p)}{1 + W_p(p) \cdot W_{об2}(p) + W_p(p) \cdot W_{об1}(p) \cdot W_d(p)}.$$

Поделим числитель и знаменатель на  $W_p(p) \cdot W_{об1}(p) \cdot W_d(p)$  и устремим коэффициент усиления регулятора к бесконечности. Таким образом, при условии малой инерционности внутреннего контура исходная двухконтурная АСР преобразуется в одноконтурную систему с эквивалентным объектом и эквивалентным регулятором:

$$W_{об,э}(p) = \frac{W_{об2}(p)}{W_{об1}(p)}; \quad W_{p,э}(p) = \frac{1}{W_d(p)} = C_3 + \frac{C_2}{p},$$

$$\text{где } W_{об2}(P) = W_{po}(P) \cdot W_T(P) \cdot W_{i1}(P),$$

$$W_{об1}(P) = W_{po}(P) \cdot W_T(P) \cdot W_{i1}(P) \cdot W_{iii}(P) \cdot W_{i234567}(P).$$

## Приложение В

### Построение переходных процессов и оценка качества работы системы

#### Расчет оптимальных параметров настройки регулятора

Определим параметры настройки дифференциатора методом расширенных частотных характеристик. Передаточная функция регулятора:

$$W_{p,\varepsilon}(p) = \frac{1}{W_o(p)} = \frac{1}{k_o(p)} + \frac{1}{k_o(p) \cdot T_o \cdot p}.$$

Замена  $P$  на комплексную переменную:  $P = (-\omega) \cdot (m - i)$ .

Настроечные параметры дифференциатора:

$$\frac{1}{k_o \cdot T_o} = \omega \cdot (m^2 + 1) \cdot \left( -\frac{\text{Im}_{oo}(m, \omega)}{A_{oo}^2(m, \omega)} \right), \quad \frac{1}{k_o} = -\frac{m \cdot \text{Im}_{oo}(m, \omega) + \text{Re}_{oo}(m, \omega)}{A_{oo}^2(m, \omega)},$$

где  $\text{Re}_{oo}(m, \omega)$  и  $\text{Im}_{oo}(m, \omega)$  расширенные ВЧХ и МЧХ объекта,  
 $A_{oo}(m, \omega) = \sqrt{\text{Re}_{oo}(m, \omega) + \text{Im}_{oo}(m, \omega)}$  – расширенная АЧХ объекта.

Задаем степень затухания  $\psi = 0,998$ , тогда степень колебательности  $m = 0,989$ .

Обозначим:  $C_2(\omega) = \frac{1}{k_o \cdot T_o}$ ,  $C_3(\omega) = \frac{1}{k_o}$ .

Построим график зависимости  $C_2(\omega) = f(C_3(\omega))$ . График представлен на рисунке 1.

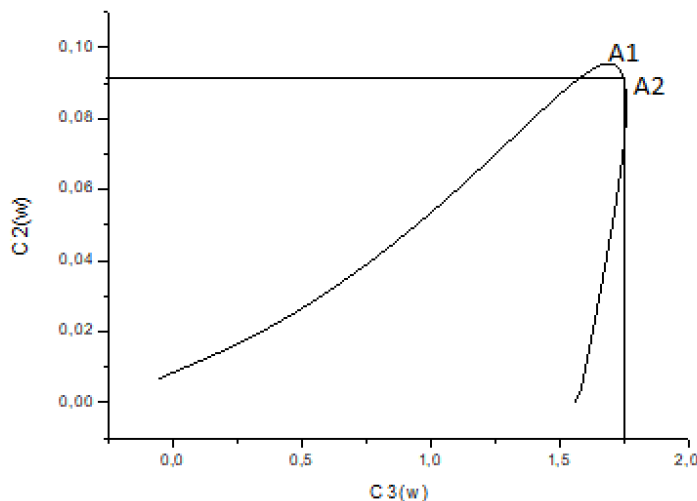


Рисунок 1 – Граница запаса устойчивости эквивалентного регулятора

На границе заданного запаса устойчивости находим значения параметров, минимизирующих принятый критерий качества работы системы.

Минимуму второго интегрального критерия соответствует точка  $0,95 \cdot \max(K_p/T_u)$  ( $K_p/T_u$ ) в сторону большего значения частоты («правее максимума»):

$$0,95 \cdot \max(K_p / T_u) = 0,95 \cdot 0,0955 = 0,090725.$$

Тогда  $T_u = \frac{K_p}{K_p / T_u} = 19,4 \text{ с.}$

Определяем оптимальные параметры настройки дифференциатора:

$$K_d = \frac{1}{K_p} = \frac{1}{1,7601} = 0,568 ; \quad T_d = T_u = 19,4 \text{ с.}$$

Передаточная функция дифференциатора  $W_o(p) = \frac{11,02 \cdot P}{19,4 \cdot P + 1}$ .

### Расчет оптимальных параметров настройки дифференциатора

Значения  $k_d$  и  $T_d$  найдены из условия, что коэффициент усиления регулятора достаточно большой, но практически его значение всегда ограничено. Поэтому необходимо определение оптимальных параметров настройки регулятора.

Дифференциатор  $W_d(p)$  совместно с объектами  $W_{об2}(p)$  и  $W_{об1}(p)$  образуют для регулятора эквивалентный объект регулирования в одноконтурной АСР с передаточной функцией:  $W_{об,э}^p(p) = W_{об2}(p) + W_{об1}(p) \cdot W_d(p)$ .

Определим параметры настройки ПИ-регулятора методом расширенных частотных характеристик. Заменяем  $P$  на комплексную переменную:  $P = (-\omega) \cdot (m - i)$ .

Настроечные параметры дифференциатора:

$$\frac{k_p}{T_u} = \frac{(-1)}{A_{обP}^2(m, \omega)} \omega \cdot (m^2 + 1) \cdot \text{Im}_{обP}(m, \omega), \quad k_p = \frac{(-1)}{A_{обP}^2(m, \omega)} \cdot (\text{Re}_{обP}(m, \omega) + m \cdot \text{Im}_{обP}(m, \omega)),$$

где  $\text{Re}_{об}(m, \omega)$  и  $\text{Im}_{об}(m, \omega)$  расширенные ВЧХ и МЧХ эквивалентного объекта,  $A_{обP}(m, \omega) = \sqrt{\text{Re}_{обP}(m, \omega) + \text{Im}_{обP}(m, \omega)}$  - расширенная АЧХ эквивалентного объекта.

Задаем степень затухания  $\psi = 0,998$ , тогда степень колебательности  $m = 0,989$ .

Обозначим:  $C_0(\omega) = \frac{k_p}{T_u}$ ,  $C_1(\omega) = k_p$ .

Построим график зависимости  $C_0(\omega) = f(C_1(\omega))$ . График представлен на рисунке 2.

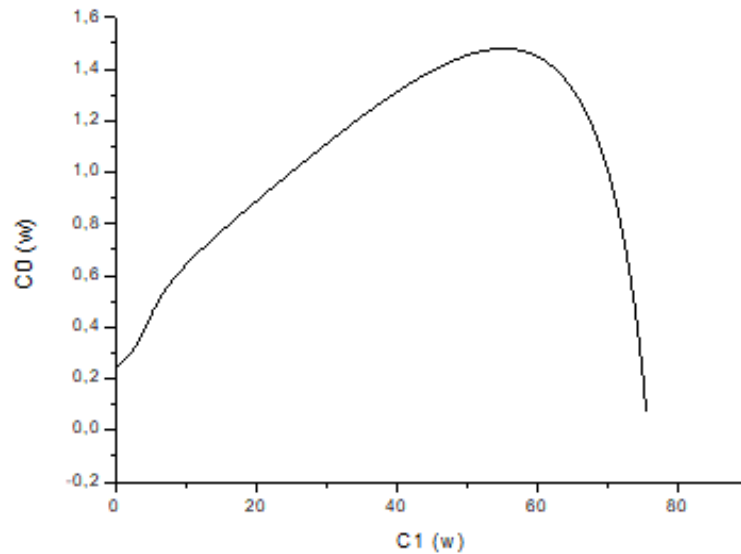


Рисунок 2 – Граница запаса устойчивости ПИ-регулятора

На границе заданного запаса устойчивости находим значения параметров, минимизирующих принятый критерий качества работы системы. Минимуму второго интегрального критерия соответствует точка  $0,95 \cdot \max(K_p/T_u)$  в сторону большего значения частоты («правее максимума»):

$$0,95 \cdot \max(K_p/T_u) = 0,95 \cdot 1,47857 = 1,40; \text{ при этом } K_p = 62,65; \omega_{рез} = 0,028$$

$$\text{Тогда } T_u = \frac{K_p}{K_p/T_u} = \frac{62,65}{1,40} = 44,75 \text{ с.}$$

$$\text{Передаточная функция ПИ-регулятора: } W_p(p) = \frac{1,40}{p} + 62,65..$$

### Проверка гипотезы о малой инерционности опережающего контура

По выражению  $\Delta(p) = \frac{W_{об1}(p) \cdot W_p(p) \cdot W_d(p)}{1 + W_{об1}(p) \cdot W_p(p) \cdot W_d(p)}$  вычисляем с помощью математического пакета MathCAD амплитуду  $A(\omega_{рез})$  и фазу  $F(\omega_{рез})$ , где  $\omega_{рез}$  - частота, при которой определены оптимальные значения  $K_d$  и  $T_d$ ,  $\omega_{рез} = 0,028$  рад/с.

$$\text{Проверяем условие: } |A(\omega)| - 1 < 0,1; F(\omega) > -5^\circ.$$

Проверка гипотезы о малой инерционности опереживающего контура с помощью математического пакета MathCAD:

$$\begin{aligned}
\omega &= 0,028; \\
p(\omega) &= i \cdot \omega; \\
\Delta\omega &= \frac{W_{об1}(p(\omega)) \cdot W_p(p(\omega)) \cdot W_d(p(\omega))}{1 + W_{об1}(p(\omega)) \cdot W_p(p(\omega)) \cdot W_d(p(\omega))}; \\
R(\omega) &= \operatorname{Re}(\Delta(\omega)); \\
I(\omega) &= \operatorname{Im}(\Delta(\omega)); \\
A(\omega) &= \sqrt{R(\omega)^2 + I(\omega)^2}; \\
U(\omega) &= \arg(\Delta(\omega)) \cdot \frac{180}{\pi}; \\
F(\omega) &= \text{if}(I(\omega) \geq 0, -360 + U(\omega), U(\omega)); \\
U(\omega) &= \arg(\Delta(\omega)); \\
U(\omega) &= -0,10186; \\
F(\omega) &= \arg(\Delta(\omega)); \\
\text{Проверка} \\
|A(\omega)| - 1 &= -0,80831; \\
F(\omega) &= -0,10186.
\end{aligned}$$

Условие выполняется:  $|A(\omega)| - 1 = -0,80831 < 0,1$ ;  $F(\omega) = -0,10186^\circ > -5^\circ$ .

Т.к. условие выполняется, то принятое предположение о малой инерционности опережающего контура допустимо.

### **Построение переходных процессов и оценка качества работы системы**

Построение переходного процесса по задающему воздействию проводим с использованием передаточной функции методом численного интегрирования:

$$W_{зс}^{x,y}(p) = \frac{W_p(p) \cdot W_{об2}(p)}{1 + W_p(p) \cdot W_{об2}(p) + W_p(p) \cdot W_{об1}(p) \cdot W_d(p)}.$$

Этот метод основан на том, что при нулевых начальных условиях и единичном ступенчатом воздействии связь между переходной характеристикой и вещественной частотной характеристикой (ВЧХ) системы имеет вид:

$$y(t) = \frac{2}{\pi} \int_0^\infty \frac{\operatorname{Re}(\omega)}{\omega} \cdot \sin(\omega t) d\omega.$$



График ВЧХ системы представлен на рисунке 3.

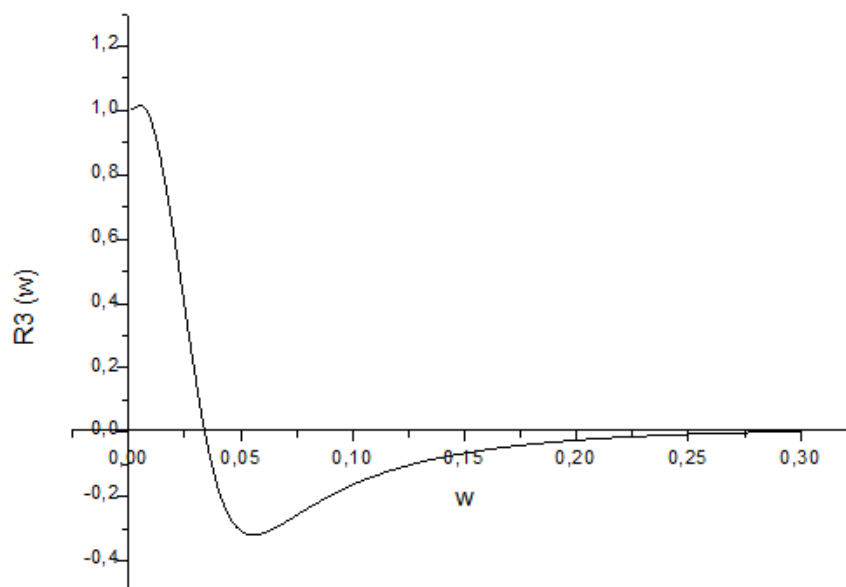


Рисунок 3 – ВЧХ системы

Резонансная частота:  $\omega_{рез} = 0,28 \text{ с}^{-1}$ .

Переходный процесс рассчитываем по формуле:

$$y(t) = \frac{2}{\pi} \int_0^{0,28} \frac{\text{Re}(\omega)}{\omega} \cdot \sin(\omega t) d\omega.$$

График переходного процесса представлен на рисунке 4.

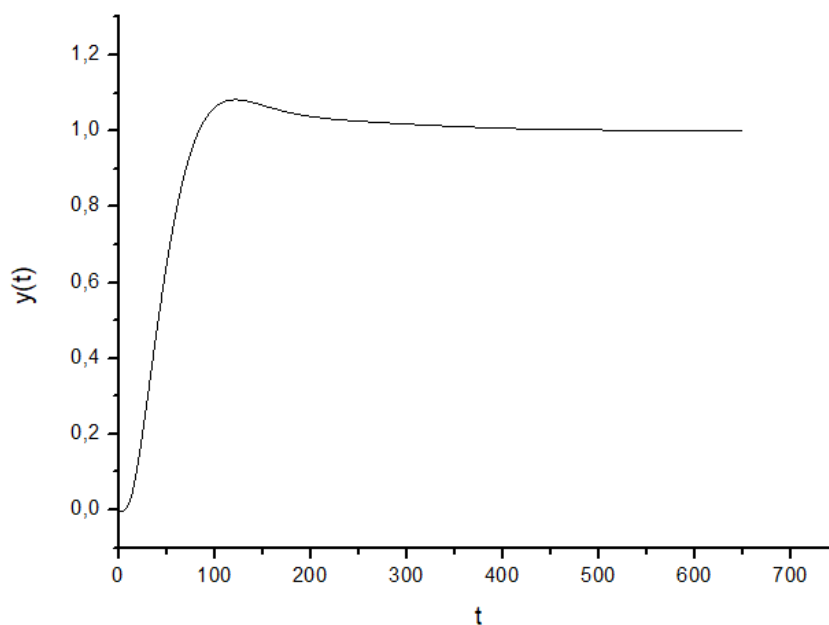


Рисунок 4 – График переходного процесса по каналу задающего воздействия

По графику переходного процесса определяем величины:

$$A_1=0,082, A_2=0.$$

Прямые оценки качества переходного процесса:

1) Максимальная динамическая ошибка:  $A_1=0,082$ .

2) Степень затухания переходного процесса:

$$\psi = \frac{A_1 - A_2}{A_1} = \frac{0,082 - 0}{0,082} = 1.$$

3) Время регулирования:  $t_p = 174$  с., т.к.  $\Delta=0,05 \cdot Y(\infty)=0,05$ .

4) Перерегулирование:  $\sigma = \frac{A_1}{Y(\infty)} \cdot 100\% = \frac{0,082}{1} \cdot 100\% = 8,2 \%$ .

5) Динамический коэффициент регулирования:

6)  $R_\sigma = \frac{A_1 + Y(\infty)}{k_{об}} 100\% = \frac{0,082 + 1}{1} \cdot 100 \% = 108,2 \%$ .

7) Статическая ошибка:  $\varepsilon_{ст} = S - Y(\infty) = 1 - 1 = 0$ .

## Приложение Г

### Заказная спецификация приборов и средств автоматизации

Позиция	Наименование, техническая характеристика приборов и средств автоматизации, завод изготовитель	Тип и марка прибора	Кол-во,
1а, 2а	Термопреобразователь, монтажная длина 200 мм, 0...600 °С, выходной сигнал 4...20 мА, предел основной приведенной погрешности ±0,25 %, НСХ (К). ПГ «Метран», г. Челябинск	ТХАУ- Метран- 271МП-07- Exd-200- ±0,25 %- 0...600 °С - 4...20 мА	2
3а	Блок управления электродвигателем реверсивный ЗАО «Волмаг», г. Чебоксары	БУЭРЗ-30М- 00	1
3б	Механизм электроисполнительный однооборотный с номинальным значением момента на выходном валу 250 Н·м, значение времени полного хода 10 с, значение полного хода 0,25 об.. ОАО «ЗЭиМ», г. Чебоксары.	МЭОФ - 250/10 - 0,25-00	1

5a	Датчик давления, диапазон измерения 0...25 МПа, предел основной приведенной погрешности ±0,5 %, выходной сигнал 4...20 мА, степень защиты IP65. ПГ «Метран», г. Челябинск	Метран-150TG-4-2G-2-1-A-25 МПа-МА-ЕМ	1					
6a	Преобразователь разности давлений, диапазон измерения 0...25 МПа, выходной сигнал 4...20 мА класс точности – 0,5. ООО НПП «Элемер» г. Зеленоград	Элемер-100-DD-1432E-K-06-МПЗ	1					
A1	Программируемый логический контроллер Simatic S7-300. Имеет 10 дискретных входов и 8 дискретных выходов. Питание 24 В. ООО «Siemens» г. Москва	S7-200 (CPU 312) 6ES7 312-1AB23-0XB0	1					
	Модуль ввода аналоговых сигналов Siemens SM 331. Входные сигналы: 0...5 В, 0...20 мА, ±5 В, ±2,5 В. Аналоговых входов: 8. Питание 24 В. ООО «Siemens» г. Москва	SM 331 6ES7 331-0HC22-0XAO	1					
	Блок питания Sitop Smart. Входное напряжение 220 В (переменное). Выходные напряжения 24 В (постоянное). ООО «Siemens» г. Москва	Sitop Smart 6EP1332-2BA10	1					
И	Л	№ докум.	Подп.	Дат.	ФЮРА.421000.004 СО1			

Испол	Бойкова			Спецификация приборов и средств	Стад	Лис	Листо
Провер	Иванова				ТРП	1	1
Н.	Медведев				ТПУ ИШЭ Б-11-1-55М71		